



HAL
open science

Physique de l'environnement terrestre, matières subtiles et hauteur de l'atmosphère

Eric Chassefière

► **To cite this version:**

Eric Chassefière. Physique de l'environnement terrestre, matières subtiles et hauteur de l'atmosphère. ISTE, 2022, 9781784058425. hal-04000342

HAL Id: hal-04000342

<https://cnrs.hal.science/hal-04000342v1>

Submitted on 9 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Eric Chassefière

PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE, MATIÈRES
SUBTILES ET HAUTEUR DE L'ATMOSPHERE AU XVIII^{ème} SIÈCLE

Table des matières

Introduction.....	6
Chapitre 1. Les mots pour qualifier l'atmosphère et les matières subtiles.....	14
1. Introduction	14
2. L'air et l'atmosphère.....	16
3. Vapeurs et exhalaisons	27
4. Matières grossières et subtiles.....	35
5. Le triptyque chaleur, feu, lumière	40
5.1 La chaleur.....	40
5.2 Le feu	44
5.3 La lumière	46
6. L'éther.....	52
7. Conclusion	54
Chapitre 2. Matière réfractive.....	58
1. Introduction.....	58
2. État des connaissances au XVII ^{ème} siècle	59
2.1 Représentations de l'atmosphère au milieu du XVII ^{ème} siècle	59
2.2 L'atmosphère des mathématiciens et la réfraction dans la première moitié du XVII ^{ème} siècle	65
2.3 Pesanteur et élasticité de la matière atmosphérique dans la deuxième moitié du XVII ^{ème} siècle.....	67
3. Arguments pour l'introduction d'une matière réfractive différente de l'air	72
3.1 Argument basé sur l'infirmité par l'observation de la théorie de la réfraction par les vapeurs et exhalaisons	72
3.2 Argument basé sur les valeurs élevées des réfractions horizontales à haute latitude	76
3.3 Argument basé sur la valeur trop grande de la réfraction horizontale prévue par le modèle barométrique.....	80
3.4 Argument basé sur l'écart jugé trop grand entre la hauteur réfractive et les hauteurs déterminées par les autres méthodes	82
3.5 Argument basé sur le jugement que la loi des sinus implique une conséquence absurde sur la trajectoire des rayons lumineux	85
4. Discussion	87
4.1 Les observateurs et la matière réfractive	87
4.2 Les cartésiens et la matière réfractive	91
4.3 Les mathématiciens et la matière réfractive	94
5. Conclusion	96
Chapitre 3. Matière solaire	99
1. Introduction	99
2. État des connaissances sur le soleil au XVII ^{ème} siècle	100
2.1 Taches solaires et rotation du soleil sur son axe	100
2.2 Nature et origine des comètes et de leurs queues	106
2.3 Lumière zodiacale et atmosphère solaire	113
2.4 L'exemple du modèle de Hartsoeker fusionnant les taches solaires, les comètes et la lumière zodiacale au sein d'une représentation unique.....	117
3. Matière solaire et hauteur de l'atmosphère au XVIII ^{ème} siècle	121
3.1 Atmosphère solaire et effet sur la durée des crépuscules.....	122

3.2 Atmosphère solaire et aurores boréales	125
4. Conclusions	136
Chapitre 4. Matière magnétique	138
1. Introduction	138
2. Principales conceptions du magnétisme au XVII^{ème} siècle.....	138
2.1 Théorie de l'aimant de Descartes et conception de Gassendi.....	138
2.2 Les connaissances sur le magnétisme au tournant du XVIII ^{ème} siècle.....	146
3. L'explication de l'aurore boréale par la matière magnétique	155
3.1 L'aurore de 1716 et l'hypothèse de Edmond Halley.....	155
3.2 Les suites de l'hypothèse de Halley	160
4. Le magnétisme dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle.....	168
5. Conclusion	176
Chapitre 5. Matière électrique	179
1. Introduction	179
2. Mise en évidence du lien entre électricité et activité orageuse	182
2.1 Les premières avancées expérimentales	182
2.2 Caractérisation de l'électricité naturelle de l'atmosphère	186
3. Les connaissances sur la nature de l'électricité au milieu du XVIII^{ème} siècle	192
4. Travaux précurseurs sur les globes de feu	194
5. L'explication par l'électricité	198
5.1 Les prémices	198
5.2 Les théories basées sur l'électricité	201
5.3 Controverses à propos de l'explication par l'électricité.....	206
6. Élucidation de l'origine des globes de feu et des étoiles tombantes	213
7. Conclusions	216
Chapitre 6. Air subtil	219
1. Introduction	219
2. Inégalité des hauteurs du mercure entre différents baromètres	221
3. Suspension de l'eau et du mercure au sommet de tubes renversés.....	223
4. Théories de la pesanteur et système de l'impulsion	235
5. Baromètres lumineux	248
6. Conclusion	257
Chapitre 7. L'illusion lunaire.....	259
1. Introduction	259
2. Historique de la problématique de l'illusion lunaire depuis l'antiquité jusqu'au début du XVII^{ème} siècle.....	261
3. L'illusion lunaire au XVI^{ème} siècle.....	267
3.1 Hypothèse d'un agrandissement par la réfraction due aux vapeurs	267
3.2 Hypothèse d'une origine physiologique par production d'images rétinienne de différentes tailles	271
3.3 Approche réfractive contre approche physiologique : la controverse entre Malebranche et Régis à la fin du XVII ^{ème} siècle	276

3.4 Explications psychologiques de l'illusion lunaire	278
4. Illusion lunaire et théories de la vision au XVIII^{ème} siècle	284
5. Courbure apparente du ciel et hauteur de l'atmosphère	290
6. Conclusion	294
Chapitre 8. Hauteur de l'atmosphère au XVII^{ème} siècle	297
1. Introduction	297
2. Définition et hauteur de l'atmosphère au XVIII^{ème} siècle	298
2.1 Définition de l'atmosphère au XVII ^{ème} et XVIII ^{ème} siècles	298
2.2 Connaissances générales sur la hauteur de l'atmosphère	302
3. Deux grands paradigmes relatifs à la composition et l'extension verticale de l'atmosphère au XVIII^{ème} siècle	305
3.1 Une atmosphère inférieure lourdement chargée en vapeurs et exhalaisons	305
3.2 Une atmosphère supérieure étendue vers le haut, mais jusqu'où ?	310
4. Les trois principales incohérences entre les estimations faites par des méthodes différentes de la hauteur de l'atmosphère	316
4.1 Première incohérence : durée des crépuscules et réfraction atmosphérique	316
4.2 Deuxième incohérence : réfraction atmosphérique et pression de l'air	319
4.3 Troisième incohérence : pression de l'air et aurores boréales	323
5. Deux autres méthodes d'estimation de la hauteur de l'atmosphère	332
5.1 Globes de feu et étoiles filantes	332
5.2 Projection de l'ombre de la Terre durant les éclipses de lune	334
6. Conclusion	335
Chapitre 9 : Atmosphères des corps terrestres	338
1. Introduction	338
2. Porosité des corps	343
2.1 Traité fondateur de Boyle	343
2.2 Théorie de Musschenbroek héritée de Newton	346
2.3 Expériences de Nollet sur la porosité	349
3. Atmosphères des corps	353
3.1 L'atmosphère des corps solides selon Boyle	353
3.2 La matière aérienne de Mariotte	355
3.3 Les expériences de distillation de Nollet	359
3.4 Atmosphère des corps liquides et formation de la glace selon Perrault	361
3.5 L'atmosphère de matière éthérée électrique et magnétique de Béraud	363
3.6 Les atmosphères ignées et lumineuses de Marat	369
4. Conclusion	383
Conclusion	385
Références	386

Introduction

Ce livre présente les méthodes développées aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles pour estimer la hauteur de l'atmosphère, méthodes pour l'essentiel fondées sur l'observation de la lumière réfractée et réfléchiée par l'atmosphère, et de certains météores, et les résultats auxquels ces méthodes conduisent, générant contradictions et avancées. Cette question de la hauteur de l'atmosphère est indissociable de celle de sa représentation, l'atmosphère passant d'un statut d'objet idéalisé et purement mathématique, ceci jusqu'au milieu du XVII^{ème} siècle, à celui d'un objet physique complexe, éminemment variable, dont le fonctionnement fait l'objet d'une multitude d'hypothèses, que les savants du XVIII^{ème} siècle tentent de concilier au sein d'une vision d'ensemble cohérente. La quête du sommet de l'atmosphère, que les différents phénomènes étudiés ne placent pas tous à la même hauteur, est durant cette période un aiguillon puissant de la recherche, du débat, et de la nécessaire synthèse qui en résulte. Plutôt que d'aborder, une par une, les différentes méthodes utilisées pour estimer la hauteur de l'atmosphère, nous adoptons une approche transversale en examinant les diverses matières subtiles introduites par les savants de l'époque pour expliquer les phénomènes dont ils dérivent cette hauteur, comme autant de jalons dans la construction de la représentation de l'atmosphère en tant qu'objet physique. Ces matières subtiles, s'inscrivant pour la plupart dans l'héritage cartésien, offrent un terrain d'investigation large, qui permet de planter le décor dans lequel s'inscrit l'évolution de la pensée scientifique de l'époque relativement à la compréhension des phénomènes atmosphériques. Il existe une cohérence d'ensemble forte entre les hypothèses faites à cette époque, qui transcende et relativise la question de l'exactitude de ces hypothèses au regard des connaissances d'aujourd'hui, montrant à quel point leur foisonnement et la confrontation des points de vue permet à la connaissance de mûrir, jusqu'à ce que se produise le saut conceptuel qui renverse les anciennes idées et permet une avancée objective. L'échelle de temps du processus est longue, de l'ordre du siècle. C'est ce travail de maturation progressive, dans la tension permanente entre l'héritage des anciens et les idées nouvelles résultant d'observations toujours plus nombreuses, riches et précises, que nous présentons dans cet ouvrage.

Le chapitre 1 est consacré à l'analyse du sens des mots utilisés au XVIII^{ème} siècle pour caractériser l'air, l'atmosphère, l'éther et plus généralement les matières subtiles. Comprendre la littérature de l'époque sur l'atmosphère, et les matières subtiles, requiert en effet de bien

comprendre le sens exact des termes utilisés, qui diffère souvent du sens qu'on leur donne aujourd'hui. Par exemple, le terme de vapeur, que nous appliquons aujourd'hui à un gaz, est alors employé pour désigner une composante de petites particules émanant de la terre ou de l'eau, dont l'union peut éventuellement conduire à la formation de nuages, ou de brouillards. Le terme d'air prend des significations différentes, suivant qu'il s'agit, par exemple, de l'air grossier, ou de l'air élémentaire. Il existe pareillement de multiples définitions de l'éther, qui englobe et, selon certains, pénètre l'atmosphère, en lui conférant, par exemple, son élasticité. Le foisonnement des idées scientifiques au XVIII^{ème} siècle, s'accompagne d'un foisonnement des sens donnés aux mots, qu'il est nécessaire d'avoir bien à l'esprit pour comprendre pleinement la nature des mécanismes invoqués. Le chapitre 1, qui ne se veut pas exhaustif, apporte un éclairage basé sur l'analyse d'un certain nombre d'entrées liées à l'atmosphère de plusieurs dictionnaires : le Dictionnaire Universel de Furetière, dont la première édition date de 1690, l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, dont la première édition est faite en 1751 et, à titre de comparaison entre les termes utilisés par les communautés scientifiques française et anglaise, le Lexicon Technicum, dont la première édition remonte à 1704. On trouve de nombreuses analogies entre les mots utilisés en France et outre-Manche, les articles des dictionnaires de l'un ou l'autre pays, citant fréquemment des auteurs de l'autre pays, mais également des différences, qui tiennent aux conceptions scientifiques qui sous-tendent l'utilisation des mots, celles-ci étant imprégnées côté français de la doctrine cartésienne. L'utilisation des trois dictionnaires permet également de noter certaines évolutions qui ont lieu dans la définition des mots scientifiques entre l'aube et le milieu du siècle des lumières, dans une période de développement rapide de la pensée scientifique.

Les chapitres 2 à 6 sont dévolus à cinq matières subtiles importantes pour notre sujet, à savoir la matière réfractive (chapitre 2), proposée par Jean-Dominique Cassini au tournant du XVIII^{ème} siècle pour lever les incohérences de la théorie attribuant aux vapeurs et exhalaisons un rôle majeur dans la réfraction, la matière solaire (chapitre 3) à laquelle fait appel Jean-Jacques Dortous de Mairan pour expliquer les aurores boréales, sur la base des observations de la lumière zodiacale faites par Cassini quelques décennies auparavant, la matière magnétique (chapitre 4), initialement proposée par Descartes selon sa théorie de l'aimant, et que Edmond Halley invoque pour donner sa propre explication des aurores boréales, la matière électrique (chapitre 5) qui sera proposée pour rendre compte des bolides traversant l'atmosphère et des étoiles filantes, objets qui demeurent mystérieux durant la plus grande partie du XVIII^{ème} siècle, et auxquels on prêtera une origine électrique, ainsi d'ailleurs qu'aux aurores boréales

postérieurement aux théories de Mairan et de Halley, enfin l'air subtil (chapitre 6), invoqué par Mairan en soutien à sa théorie de l'aurore boréale pour expliquer la mise en suspension à des hauteurs considérables de la matière solaire.

Le chapitre 2 est donc consacré à la matière réfractive. Après avoir posé le contexte en termes de représentations de l'atmosphère à la fin du XVII^{ème} siècle, suite à la découverte du caractère pesant de l'atmosphère, et de l'élasticité de l'air, qui font entrer l'atmosphère au rang d'objet physique directement observable, et mesurable, au laboratoire et dans la nature, nous analysons les arguments utilisés au début du XVIII^{ème} siècle en faveur de l'existence d'une matière réfractive spécifique non pesante, pour expliquer les observations de la réfraction de la lumière des astres par l'atmosphère. Nous montrons que cette idée d'une matière réfractive s'inscrit bien dans la pensée cartésienne alors dominante à l'Académie des Sciences, et ses contradictions, naissant notamment de l'incohérence entre le rôle supposé majeur, au plan théorique, des vapeurs condensées dans le processus de réfraction atmosphérique, et l'observation qui, au contraire, ne fait pas apparaître de lien entre réfraction et particules. Cette idée n'a pas été reprise et développée outre-Manche, où, dès la fin du XVII^{ème} siècle, Isaac Newton a compris le rôle essentiel joué par la température de l'air, et Halley le rôle des vents dans la modulation de la pression barométrique, sans avoir besoin de recourir à l'effet des vapeurs et des exhalaisons. Un effet collatéral bénéfique de l'introduction de la matière réfractive a été le développement de modèles paramétriques, utilisant l'approche différentielle, de la réfraction, comme celui de Pierre Bouguer. Ces modèles, développés au départ par les savants français et anglais, ont permis l'élaboration de modèles détaillés, incluant à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle la prise en compte précise de la température, et débouchant à la fin du siècle sur le modèle totalement cohérent de Laplace, qui scelle l'abandon définitif de la matière réfractive.

Le chapitre 3 traite de l'atmosphère solaire. Nous posons d'abord le cadre riche et foisonnant, à la fin du XVII^{ème} siècle, des conceptions relatives aux taches solaires, à la lumière zodiacale et aux comètes, vus comme des phénomènes en relations étroites les uns avec les autres par le biais d'une atmosphère solaire active dans de nombreux compartiments de l'espace planétaire et des planètes. Puis nous nous intéressons à la théorie des aurores boréales élaborée par Mairan au début du XVIII^{ème} siècle, à savoir la précipitation épisodique dans l'atmosphère terrestre d'une matière solaire subtile supposée se mélanger à la matière atmosphérique et devenir lumineuse du fait de ce mélange. Nous montrons comment cette théorie s'inscrit dans le cadre

de pensée issue des deux siècles précédents, donnons les estimations de la hauteur des structures aurorales faites par Mairan et d'autres savants, replaçons la théorie dans le contexte des grands courants de pensée de l'époque, dont la tendance des cartésiens à majorer considérablement la hauteur de l'atmosphère au début du XVIII^{ème} siècle, détaillons les théories concurrentes élaborées par Edmond Halley et Leonhard Euler. Nous examinons également l'impact de l'existence d'une atmosphère solaire sur la hauteur de l'atmosphère déduite de la durée des crépuscules, question adressée au début du siècle précédent par Johannes Kepler, qui ne donnait pas à l'atmosphère une hauteur supérieure à quelques kilomètres, et à laquelle Philippe de La Hire, un siècle plus tard, apporte des éléments de réponse.

Nous examinons au chapitre 4 la question de la matière magnétique. Au début du XVIII^{ème} siècle, Halley, spectateur d'une aurore boréale, a l'intuition que les figures lumineuses de l'aurore sont la manifestation visuelle de la matière magnétique qui circule, d'un pôle à l'autre, dans la haute atmosphère de la Terre, ou l'éther, suivant la représentation cartésienne du tourbillon de l'aimant. Cette intuition lui est dictée par la disposition que prend la limaille de fer répandue au voisinage d'un aimant, qui rappelle celle des faisceaux auroraux. Cette idée sera reprise par Charles François de Cisternay Dufay, étudiant quelques années plus tard les propriétés de l'aimant, comme une preuve de la circulation de la matière magnétique dans un seul sens, et non pas dans les deux sens, comme le suppose Descartes dans son système du monde. Cette question de la circulation de la matière magnétique, et en particulier celle de son sens d'écoulement dans l'aimant, qui est au cœur de la problématique de Halley, préoccupe durant cette période de nombreux savants, qui réalisent des expériences pour essayer de mettre en évidence la matière magnétique, et la caractériser. Ainsi, l'aurore boréale, comme expérience grandeur nature révélant la matière magnétique terrestre, prend-elle une place centrale dans cette période d'évolution progressive de la conception de l'aimant, qui va conduire dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle à l'abandon de la notion de circulation de la matière magnétique. Nous exposons dans cet article le contexte hérité du XVII^{ème} siècle dans lequel s'inscrit la pensée de Halley, les détails de son explication et les suites qu'aura son travail dans le domaine du magnétisme, ainsi que l'évolution plus générale de la conception de l'aimant à son époque et jusqu'à la fin du XVIII^{ème} siècle.

Le chapitre 5 est consacré à la matière électrique. L'élucidation de la nature des globes de feu (les météoroïdes entrant dans l'atmosphère, suivant la terminologie moderne), dont les premières observations documentées remontent au XVII^{ème} siècle, et qui fournissent des

informations sur la hauteur de l'atmosphère, s'étend sur la totalité du XVIII^{ème} siècle. L'origine extraterrestre de ces corps, pressentie dès la fin du XVII^{ème} siècle, mais qui viole la doctrine cartésienne des météores héritée d'Aristote, met très longtemps à s'imposer, entre la première proposition scientifiquement étayée qui en est faite par Halley au début du XVIII^{ème} siècle, et la théorie, pour l'essentiel exacte, proposée par Ernst Chladni à la fin du même siècle. Les quelques articles sur la question qui jalonnent le XVIII^{ème} siècle font apparaître, vers le milieu du siècle, période de développement rapide de l'expérimentation de l'électricité atmosphérique par des pointes métalliques et des cerfs-volants, et qui débouche sur la mise en évidence du caractère électrique des phénomènes orageux, le fluide électrique comme un agent essentiel des globes de feu et des étoiles filantes, ainsi que des aurores boréales, ces différents phénomènes étant considérés par de nombreux savants de l'époque comme étroitement liés. La deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle est marquée par une tendance générale à attribuer de nombreux phénomènes faisant intervenir le feu à l'électricité, et les météores précédemment cités n'échappent pas à la règle. Le caractère électrique des globes de feu est âprement débattu durant cette période, l'hypothèse électrique ayant ses partisans farouches et ses détracteurs, qui expriment des doutes sur la base des observations, dont ils estiment certains aspects contradictoires avec une nature électrique du phénomène.

Le chapitre 6 traite de la question de l'air subtil, plus délicat que l'air que nous respirons, mais moins subtil que l'éther, en relation avec la théorie des aurores boréales de Jean-Jacques Dortous de Mairan. La très grande hauteur estimée des structures aurorales, qui tournent avec la Terre et sont supposées par la plupart des savants de l'époque être immergées dans sa haute atmosphère, suggèrent que la matière aurorale, que Mairan suppose être issue de l'atmosphère solaire, se mêle avec un air très fin, s'étendant bien plus haut que l'air grossier, dont la pression est mesurée par le baromètre. Nous analysons dans ce chapitre le cadre conceptuel issu du XVII^{ème} siècle, dans lequel il faut replacer le système de Mairan, ainsi que les preuves expérimentales sur lequel Mairan et ses contemporains s'appuient pour postuler l'existence de l'air subtil : inégalité du niveau du mercure dans différents baromètres, suspension du mercure à grande hauteur dans des tubes renversés, phosphore mercuriel, adhérence considérable de plans polis joints, théories de la cohérence des corps solides. Nous montrons en quoi l'hypothèse de l'air subtil permet à Mairan de s'affranchir de difficultés résultant d'estimations divergentes de la hauteur de l'atmosphère suivant différentes méthodes, et comment, grâce à l'introduction de l'air subtil, un tableau cohérent de la structure verticale de l'atmosphère se

dégage des travaux réalisés dans la seconde moitié du XVII^{ème} siècle et tout au long du XVIII^{ème} siècle.

Le chapitre 7 est consacré à la question de la lune agrandie, phénomène désigné aujourd'hui sous le nom d' « *illusion lunaire* », qui nous fait paraître la lune au voisinage de l'horizon plus grande que lorsqu'elle passe au méridien. Ce phénomène, longtemps attribué à la réfraction de la lumière par les impuretés de l'atmosphère, et qui constitue au Moyen-Âge et à la Renaissance un paradigme majeur en forgeant la représentation, connaît au XVII^{ème} siècle un regain d'intérêt, provoquant un débat intense entre partisans de l'hypothèse réfractive, tenants de l'hypothèse physiologique de l'image rétinienne agrandie, et défenseurs de plus en plus nombreux de l'hypothèse psychologique. Ce débat peut paraître, vu d'aujourd'hui, surprenant, puisque, dès le début du XVII^{ème} siècle, des astronomes qui font autorité, comme Kepler, mesurent le diamètre angulaire de la lune à l'horizon, et ne le trouvent pas plus grand qu'au méridien. Mais les partisans de l'effet de la réfraction atmosphérique, et ceux de l'effet physiologique, continuent néanmoins durant tout le XVII^{ème} siècle à défendre la réalité physique de l'agrandissement, et fournissent des arguments pour rendre cette réalité compatible avec celle de l'absence d'agrandissement physique constaté par les astronomes. Cette question est également liée à celle de la hauteur de l'atmosphère via la théorie de la voûte aplatie du ciel, introduite par Abu Ali al-Hasan ibn al-Haytham, plus connu sous le nom d'Alhazen, dans le monde arabe au Moyen-Âge, puis par les penseurs occidentaux des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles, pour quantifier l'agrandissement apparent de la lune suivant une approche géométrique. Nous retraçons dans ce chapitre l'histoire de l'interprétation de l'illusion lunaire, et des trois grands types de raisons invoquées pour l'expliquer : physique, physiologique et psychologique, jusqu'à la fin du XVII^{ème} siècle, et des nombreux débats auxquels elles ont donné lieu. Nous montrons comment, au XVIII^{ème} siècle, a été élaborée une représentation mathématique de la voûte céleste perçue par nos yeux, matérialisant à la fois le sommet du bleu du ciel et la surface nocturne sur laquelle glissent les images des astres, à partir de mesures subjectives de l'agrandissement de la lune sur l'horizon et d'angles définissant le degré d'anisotropie de l'espace visuel tel que nous le percevons, plus profond vers l'horizon que haut vers le zénith. Nous montrons comment, de cette caractérisation, est née l'idée d'utiliser la voûte aplatie du ciel pour estimer une hauteur de l'atmosphère, celle-ci étant subjective, et sa valeur assez peu précise.

Le chapitre 8 est consacré à une synthèse des résultats obtenus pour la hauteur de l'atmosphère à partir des différentes méthodes utilisées, dont l'interprétation fait appel à une ou plusieurs des matières subtiles analysées dans les chapitres précédents : la réfraction atmosphérique (matière réfractive), la durée des crépuscules (atmosphère solaire), les aurores boréales (matières solaire et magnétique, air subtil), les bolides et étoiles filantes (matière électrique). Nous décrivons le contexte, en termes de représentations de l'atmosphère et d'interprétation des différents phénomènes utilisés pour estimer sa hauteur. Nous analysons, à la lumière des représentations alors dominantes de l'atmosphère, notamment de la présence d'une composante jugée majeure, en termes de poids et de pouvoir réfractif, de vapeurs et exhalaisons, ou encore de l'existence d'une composante plus fine, voire subtile, de l'atmosphère s'étendant à très grande hauteur au-dessus de la Terre, et des conceptions développées au tournant du siècle sur les matières subtiles, les contradictions qui émaillent l'évolution de l'estimation de la hauteur de l'atmosphère par les différentes méthodes, et les arguments développées pour les résoudre. Plus généralement, l'introduction de ces nombreuses matières subtiles amène à des débats très riches, qui conduisent, à l'aube du XIX^{ème} siècle, à une vision relativement unifiée, étayée scientifiquement, de l'atmosphère de la Terre et de son extension verticale. Les nombreux concepts développés à l'époque, dans un cadre de pensée différent de l'actuel, qui a sa propre logique, et donc sa propre vérité, se traduisent par des avancées, à l'épreuve de l'observation de l'atmosphère, toujours tendues vers la recherche d'une cohérence globale de la représentation de l'objet physique que constitue, pour les savants des Lumières, cette atmosphère. On voit apparaître notamment l'idée d'une stratification verticale de l'atmosphère, non plus basée sur les catégories aristotéliennes, mais sur des critères de nature physique portant sur différentes caractéristiques comme la densité, ou l'état électrique par exemple, atmosphère, donc, multi-phénomènes et multi-hauteurs.

Nous nous intéressons au chapitre 9 à la question des atmosphères des corps terrestres, qui se situe précisément à la charnière entre atmosphère et matières subtiles. Nous explorons le champ vaste des divers processus d'échange envisagés à cette époque entre les corps solides et l'atmosphère terrestre, responsables d'atmosphères particulières entourant ces corps. Ces processus supposent une circulation de matière via les pores des corps, gros pores pour les vapeurs épaisses et l'air, petits pores pour les matières subtiles. La porosité des corps, en nature et en termes de caractéristiques physique, est un aspect essentiel de cette question, et nous présentons d'abord les différentes observations et théories de l'époque sur ce sujet. Puis nous nous intéressons aux atmosphères des corps proprement dites, en détaillant là encore

observations et théories, et en passant en revue les différentes matières impliquées dans la formation de ces atmosphères : air, vapeurs diverses, fluides électrique et magnétique, fluides igné ou calorique, ou lumineux, etc... Ces théories s'appuient dans certains cas sur des représentations particulières de l'atmosphère et de l'éther, et sur des principes de physique tels que la dissolution, appliquée à l'éther, ou au fluide igné, comme solvants, et aux corps terrestres ou aqueux, comme substances dissoutes, au sein d'un air qui en serait le mélange, que nous nous efforçons de remettre en perspective dans le contexte de l'époque. On voit émerger du foisonnement d'idées en la matière un monde étroitement interconnecté, où les corps solides, leurs atmosphères particulières et l'atmosphère globale de la terre interagissent en permanence à travers la circulation de matières subtiles, ou épaisses, au sein des corps solides et de leurs atmosphères, par lesquels ils sont en contact les uns avec les autres, échangeant matière et mouvement.

Tous les extraits de texte reproduits dans ce livre provenant de sources écrites en anglais ont été traduits par l'auteur.

Chapitre 1. Les mots pour qualifier l'atmosphère et les matières subtiles

1. Introduction

Ce chapitre est dédié à l'examen des mots employés au début et au milieu du XVIII^{ème} siècle pour qualifier l'atmosphère, et tout ce qui touche à son fonctionnement, ainsi que l'éther et les matières subtiles qui participent étroitement de son environnement et de sa composition. Cette connaissance du sens précis des mots désignant l'atmosphère et ses différentes composantes, s'intégrant dans un cadre de pensée très différent de l'actuel, est nécessaire pour comprendre l'évolution de la pensée de l'époque. Nous nous limitons ici volontairement aux définitions données dans quelques dictionnaires, à savoir : (i) le Dictionnaire Universel de Furetière, dont la première édition remonte à 1690, et une quatrième édition enrichie à 1727, (ii) l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, 1^{ère} édition, publiée en 1751, (iii) le Lexicon Technicum anglais, dont la première publication remonte à 1704. Des éléments plus approfondis seront fournis au fil des chapitres suivants.

Le dictionnaire de Furetière a pour intitulé exact : « *Dictionnaire Universel, Contenant généralement tous les mots français, tant vieux que modernes, & les Termes de toutes les Sciences et des Arts* ». Conçu pour pallier l'absence de prise en compte des mots scientifiques, techniques et artistiques dans le Dictionnaire de l'Académie, qui ne paraît qu'en 1694, ce dictionnaire, dont la rédaction a été entamée par Antoine de Furetière dans les années 1650, constitue une somme importante des connaissances scientifiques et techniques au tournant du XVIII^{ème} siècle. Sa publication, d'abord sous la forme d'un extrait en 1684, puis en totalité en 1690, deux ans après la mort de Furetière, bien qu'avalisée par Louis XIV, vaut à son auteur son exclusion de l'Académie Française, dont une (courte) majorité de membres ne voyait pas d'un bon œil cette initiative concurrente de celle de l'Institution. Outre le contenu de l'édition de 1690, une comparaison de ce contenu avec celui, enrichi, de l'édition de 1727, fournit d'intéressants éléments sur l'évolution du sens des mots, et des connaissances sous-jacentes, durant le premier quart du XVIII^{ème} siècle. L'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, publiée au milieu du XVIII^{ème} siècle, fournit une somme autrement plus importante, qui traduit bien le développement rapide de la pensée scientifique dans la première moitié du siècle. Nous nous limitons dans ce chapitre à cette période, pendant laquelle se développent les réflexions sur la hauteur de l'atmosphère, et les matières subtiles invoquées pour expliquer les divergences qui

se font rapidement jour entre les estimations déduites par les différentes méthodes. Les progrès de la connaissance entre 1727, date de la quatrième édition du Furetière, et 1751, date de la première édition de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, sont très significatifs, et nous nous attacherons à tracer les grandes lignes de cette évolution. On notera dans ce chapitre DUF-1690 et DUF-1727 les éditions du Dictionnaire Universel Furetière de 1690 et 1727.

La première encyclopédie alphabétique anglaise est le « *Lexicon Technicum : or, An Universal English Dictionary of Arts and Sciences : Explaining not only the Terms of Art, but the Arts Themselves* ». Bien que l'accent y soit mis sur les sujets mathématiques, il ne renferme pas que des termes de nature scientifique ou technique, mais inclut également des entrées relatives au droit, au commerce, à la musique et aux arts en général. Il est l'œuvre du pasteur John Harris, qui revendique pour son dictionnaire, non seulement la fonction de donner le sens des mots scientifiques et artistiques, mais également des éléments de connaissance sur les sciences et les arts nommés par les mots, dans une démarche universaliste qui sera celle de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert un demi-siècle plus tard. Nous nous sommes limité dans le présent chapitre à la première édition du Lexicon datant de 1704, constituant un premier volume, un deuxième volume constitué d'ajouts, consistant pour l'essentiel en tables mathématiques et astronomiques, étant publié en 1710. Trois autres éditions du premier volume sont faites dans un laps de temps rapproché, en 1708, 1716 et 1725, les deux volumes n'étant publiés ensemble qu'en 1736. Dans sa préface, Harris insiste sur le fait que le contenu de son dictionnaire ne provient pas d'autres dictionnaires, mais qu'il est collecté à partir des œuvres originales des meilleurs auteurs, ce qui en fait donc une source à part entière d'information, distincte quant à ses contenus du Furetière, et par ailleurs spécifique du contexte scientifique anglais, différant par bien des points du contexte français, comme nous le verrons.

Nous examinons dans la partie 2 les définitions de l'air et de l'atmosphère, ces deux termes étant loin d'être équivalents. Les parties 3 et 4 sont consacrées, respectivement, aux vapeurs et exhalaisons, et aux matières subtiles, deux composantes essentielles de l'atmosphère, le traitement des matières subtiles nécessitant de s'intéresser aussi à la définition de la matière « normale » (« grossière », par opposition à « subtile »). La partie 5 est consacrée au triptyque constitué des trois matières subtiles que sont la chaleur, le feu et la lumière, étroitement liées par de multiples relations, démontrées ou conjecturales. Nous traitons dans la partie 6 la question du sens donné au mot éther, dans sa relation complexe avec l'atmosphère. Nous terminons par une conclusion, qui constitue également l'introduction au corps principal de

l'ouvrage, qui traite des matières subtiles, en relation avec la question de la hauteur de l'atmosphère. Nous sommes naturellement amenés, dans cette analyse, à mener une investigation sur les concepts scientifiques sous-jacents aux mots utilisés, puisqu'ils en forgent en partie le sens, l'approche scientifique naissante contribuant à infléchir ce sens en fonction des caractères, avérés ou supposés, des milieux et des phénomènes désignés. Cette investigation est cependant réduite au minimum, dans l'esprit même des dictionnaires utilisés, les contenus scientifique propres au sujet premier de l'ouvrage, à savoir la hauteur de l'atmosphère, étant développés dans les chapitres suivants. Nous n'avons pas retenu l'intégralité de la matière traitée dans les différents articles analysés, en nous focalisant sur ceux qui ont un rapport direct avec la thématique de ce livre.

2. L'air et l'atmosphère

Le mot ATMOSPHERE ne fait l'objet dans le DUF-1690 que d'une courte définition :

C'est la partie de l'air qui est chargée de vapeurs, ou de nuages, & qui n'a pas la pureté de la région éthérée : c'est ce qui cause la réfraction de la lumière des astres. La lune paraît plus grosse à son lever, à cause des vapeurs de l'Atmosphère.

Cette définition sous-entend que l'atmosphère n'est qu'une partie de l'air, celle à laquelle sont mélangés les vapeurs et les nuages. La pureté est ici un critère qui sert à distinguer l'atmosphère de l'éther, ou encore de la région éthérée, et le phénomène de la réfraction atmosphérique y semble associé à la présence des vapeurs et des nuages. La deuxième phrase, qui fait référence à ce que nous appelons aujourd'hui l'illusion lunaire, c'est-à-dire l'agrandissement apparent de la lune lorsqu'elle se trouve au voisinage de l'horizon, longtemps attribué à la réfraction, confirme le lien que semble établir la première entre présence de vapeurs et réfraction atmosphérique. La définition de l'atmosphère dans le DUF-1727 est un peu plus étoffée. Il y est rajouté que la partie de l'air chargée de vapeurs et de nuages est « *la plus grossière, & la plus pesante* », idée dont nous verrons qu'elle joue un rôle essentiel dans la représentation que les savants, notamment français, se font de notre atmosphère et de certaines de ses caractéristiques, comme la pression atmosphérique. La phrase suivante, à propos de l'atmosphère, est également ajoutée dans l'édition de 1727 : « *Elle se termine à une certaine distance, & forme comme un globe qui environne, & enferme celui de la terre* ». Ainsi, l'idée d'un sommet physique de l'atmosphère, situé « *à une certaine distance* », se fait plus nettement

jour au tournant du XVIII^{ème} siècle. L'attribution aux vapeurs de l'agrandissement apparent de la lune à l'horizon subsiste dans l'édition de 1727. L'article RÉFRACTION du DUF-1727 est instructif à cet égard. On peut y lire, à la propos de la réfraction atmosphérique, et de la lumière du crépuscule qui est renvoyée par le ciel une fois le soleil couché :

& si la grossièreté de l'air, qui semble causer ces grandes réfractions, y donne aussi de plus grands crépuscules, comme il y a de l'apparence : dans la plus grande obscurité de la nuit de six mois qui est sous le Pôle, il y aura encore un crépuscule assez grand même sans la Lune, & cette utilité les dédommage des incommodités de l'air grossier qu'ils respirent

Ainsi, tant pour ce qui concerne la réfraction de la lumière des astres, que la réflexion de la lumière du soleil durant le crépuscule, c'est à la grossièreté de l'air dans sa partie basse, donc aux impuretés qu'il contient (vapeurs, exhalaisons, nuages), auxquelles elle doit précisément sa dénomination d'atmosphère (« *sphère des vapeurs* »), qu'il faut les attribuer. Mais qu'est-ce que l'air exactement ? Le DUF-1690 nous dit, à propos de l'air :

Élément liquide & léger qui environne le globe terrestre ; la mer & la terre. L'air se divise en basse, en moyenne, & en suprême région. L'eau se résout, s'évapore en air. On ne peut vivre sans la respiration de l'air. On ne peut pas vivre de l'air. Les Anciens n'ont point connu la pesanteur de l'air. On connaît la gravité de l'air par le Baromètre, sa chaleur par le Thermomètre, sa sécheresse par l'Hygromètre. On a trouvé l'invention de pomper l'air pour faire du vide, par la machine de Mr. Boyle. Mr. Mariotte dans ses Essais de Physique dit que l'air se peut dilater plus de quatre mille fois davantage qu'il n'est auprès de la terre avant que d'être dans sa dilatation naturelle, telle qu'il l'a au haut de l'athmosphère, où il n'est chargé d'aucun poids. Sa hauteur, suivant son calcul, ne va guère qu'à 20 lieues : & elle n'irait pas à 30 quand il serait huit millions de fois plus raréfié que celui qui est près de la terre.

Dans l'édition de 1727, ce n'est pas l'élément qui est qualifié de liquide et léger, mais la matière, ou encore la substance, et une définition plus précise de la stratification verticale de l'air est fournie :

Élément ; matière liquide, légère, & transparente, qui environne le globe terrestre ; substance fluide, & humide, qui sert à la respiration. La masse de l'air se divise en basse, en moyenne, & en suprême région. La région basse, ou inférieure de l'air est celle que nous habitons, & que l'on borne par la réflexion des rayons du soleil. Elle est tantôt froide, & tantôt chaude, suivant la diversité des climats, & des saisons. La moyenne région de l'air, est l'espace d'air depuis le sommet des plus hautes

montagnes, jusqu'à la basse région de l'air que nous respirons. Elle est froide, & humide, à cause des vapeurs, & des exhalaisons que le soleil y élève. La région supérieure de l'air, est celle qui s'étend depuis la cime des montagnes, jusqu'à la région du feu élémentaire ; elle est plus pure, plus rare, & plus légère que les autres

L'air est certes un « élément » au sens des anciens : « *les anciens Philosophes reconnaissaient quatre éléments, le feu, l'air, l'eau, & la terre. Ces quatre éléments vulgaires ne sont pas des éléments, à proprement parler, parce que ce sont des corps composés ; & non pas des corps simples, & sans mélange* » (F1727). Mais il est aussi, et surtout, en ce début du XVIII^{ème} siècle, une matière physique que l'on peut caractériser par la mesure, et dont la répartition suivant la hauteur peut être prédite par application de la loi des dilatations, encore appelée aujourd'hui de Boyle-Mariotte. Et cette matière n'est pas sans mélange, comme le montre par exemple le fait que l'air contient un certain degré d'humidité. La stratification de l'atmosphère exprimée ci-dessus est héritée de la conception aristotélicienne, mais des critères relativement précis sont fournis pour définir les limites entre couches. La région moyenne est celle qui contient vapeurs et nuages, et qui donne lieu à la réflexion des rayons du soleil. L'atmosphère consiste donc dans la réunion des régions basse et moyenne, et s'étend de la surface de la terre jusqu'au sommet des plus hautes montagnes. La région suprême, celle de l'air « *pur* » et « *rare* », au-dessus des plus hautes montagnes, s'étend jusqu'au feu élémentaire, donc jusqu'à l'élément feu, qui emplît, dans la conception aristotélicienne, l'espace sublunaire au-dessus de l'air.

L'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751) montre une évolution sensible de la définition de l'atmosphère. Ce nom y est présenté comme celui « *qu'on donne à l'air qui environne la terre, c'est-à-dire à ce fluide rare & élastique dont la terre est couverte partout à une hauteur considérable, qui gravite vers le centre de la terre & pèse sur sa surface, qui est emporté avec la terre autour du soleil, & qui en partage le mouvement tant annuel que diurne* ». L'élasticité de l'air est mise en avant, et l'air ne s'y élève plus « *à une certaine distance* », mais « *à une hauteur considérable* ». L'atmosphère est devenue pour la plupart des savants « *la masse entière de l'air qui environne la terre* », même si « *quelques écrivains ne donnent le nom d'atmosphère qu'à la partie de l'air proche de la terre qui reçoit les vapeurs & les exhalaisons, & qui rompt sensiblement les rayons de lumière* ». L'atmosphère n'est pas bornée à son sommet par le feu élémentaire, mais par « *une matière plus subtile qu'on appelle éther* », et « *l'espace qui est au-dessus de l'air grossier, quoique qu'il ne soit peut-être pas entièrement vide d'air, [...], est appelé région éthérée ou espace éthéré* ». Ainsi, on ne peut exclure, vers le haut de

l'atmosphère, dorénavant masse entière de l'air, l'existence d'un air pur, celui de la « *suprême région* », telle que définie dans le DUF.

La définition de l'air dans l'Encyclopédie montre aussi une évolution notable. Celui-ci y est défini comme un « *corps léger, fluide, transparent, capable de compression & de dilatation* ». Ce corps ne peut être considéré comme un élément, « *quoiqu'il puisse avoir des parties qui méritent cette dénomination* ». Il existe deux types d'air : (i) un « *air vulgaire ou hétérogène* », (ii) un « *air propre ou élémentaire* ». « *L'air vulgaire ou hétérogène est un assemblage de corpuscules de différentes sortes, qui toutes ensemble constituent une masse fluide, dans laquelle nous vivons & nous nous mouvons, & que nous inspirons & expirons alternativement* ». On retrouve l'air chargé de vapeurs et de nuages (l'air grossier), composé de substances hétérogènes, dont il est dit qu'elles peuvent se réduire à deux sortes :

1°. la matière de la lumière ou du feu, qui émane perpétuellement des corps célestes. A quoi quelques Physiciens ajoutent les émanations magnétiques de la terre, vraies ou prétendues.

2°. Ce nombre infini de particules qui s'élèvent en forme de vapeurs ou d'exhalaisons sèches de la terre, de l'eau, des minéraux, des végétaux, des animaux, &c. soit par la chaleur du soleil, ou par celle des feux souterrains, ou par celle des foyers.

Ce qui est appelé « *air élémentaire* » est l'air « *proprement dit* », « *une matière subtile, homogène & élastique, qui est la base, pour ainsi dire, & l'ingrédient fondamental de tout l'air de l'atmosphère, & qui lui donne son nom* ». Il s'agit donc de l'air pur du haut, mélangé dans la partie basse de l'atmosphère aux vapeurs et exhalaisons émanant de la terre. On voit également apparaître parmi les substances hétérogènes diverses matières subtiles, sur lesquelles nous reviendrons.

L'article ATMOSPHÈRE de l'Encyclopédie consacre plusieurs paragraphes à la question de la hauteur de l'atmosphère, que nous traiterons abondamment dans les chapitres suivants. Une borne inférieure à la hauteur de l'atmosphère peut être calculée en faisant l'hypothèse d'un air homogène, sans force élastique, donc partout de la même densité. La mesure de la hauteur du mercure dans le baromètre fournit le poids de la colonne d'air, et connaissant le rapport de la densité du mercure à celle de « *l'air que nous respirons ici-bas* », à savoir 10800, la hauteur de l'atmosphère, supposée homogène, est estimée être de 2 lieues $\frac{1}{4}$ (8,7 km). Cette valeur est une limite inférieure, en vertu de l'élasticité de l'air :

[...] l'air par son élasticité a la vertu de se comprimer & de se dilater : on a trouvé par différentes expériences fréquemment répétées en France, en Angleterre & en Italie, que les différents espaces qu'il occupe, lorsqu'il est comprimé par différents poids, sont réciproquement proportionnels à ces poids : c'est-à-dire, que l'air occupe moins d'espace en même raison qu'il est plus pressé ; d'où il s'ensuit, que dans la partie supérieure de l'atmosphère, où l'air est beaucoup moins comprimé, il doit être beaucoup plus raréfié qu'il ne l'est proche la surface de la terre ; & que par conséquent la hauteur de l'atmosphère doit être beaucoup plus grande que celle que nous venons de trouver.

La prise en compte de la dilatation dans le calcul de la structure verticale de la densité de l'air a été réalisée par Mariotte, et d'autres, dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle, conduisant à une densité qui forme avec la hauteur une « *proportion géométrique continue* », c'est-à-dire qui décroît exponentiellement avec l'altitude. Il suit que « *la règle des compressions en raison des poids ne peut donner la hauteur de l'atmosphère ; car il faudrait que cette hauteur fût infinie, & que la densité de l'air fût nulle à sa surface supérieure* ». Mais un autre obstacle interdit d'estimer par cette méthode la hauteur de l'atmosphère. Jean-Dominique Cassini, lors de sa campagne de mesures destinée à prolonger la méridienne de l'Observatoire de Paris, a mesuré précisément les hauteurs de plusieurs montagnes, ainsi que les pressions régnant au sommet de ces montagnes. Il a trouvé des lois de variation avec la hauteur ne correspondant pas à la loi des dilatations de Boyle-Mariotte. La dilatation augmente plus vite que l'inverse du poids comprimant en altitude (comme l'inverse du carré de ce poids selon lui). L'Académie a mené de nombreuses expériences à pression réduite, expérimentant des dilatations de l'air beaucoup plus grandes que celles à l'œuvre sur le sommet des montagnes, et n'a pas trouvé d'écart à la loi de Boyle-Mariotte. D'où :

[...] quelques Physiciens ont conclu, que l'air qui est sur le sommet des montagnes est d'une nature différente de l'air que nous respirons ici-bas, & suit apparemment d'autres lois dans sa dilatation & sa compression.

La raison de cette différence doit être attribuée à la quantité de vapeurs & d'exhalaisons grossières, dont l'air est chargé, & qui est bien plus considérable dans la partie inférieure de l'atmosphère qu'au-dessus. Ces vapeurs étant moins élastiques & moins capables par conséquent de raréfaction que l'air pur, il faut nécessairement que les raréfactions de l'air pur augmentent en plus grande raison que le poids ne diminue.

Ainsi, l'air élémentaire du haut serait par nature différent de l'air hétérogène du bas, moins élastique à cause des vapeurs et des exhalaisons qu'il contient, ce qui ne permet pas de conclure

sur la hauteur de l'atmosphère à partir des seules mesures de pression faites à différentes hauteurs, puisqu'il n'est pas possible d'extrapoler à grande hauteur les mesures faites au voisinage de la surface de la terre à partir d'une loi unique des dilatations de l'air :

Quoi qu'il en soit, il est constant que les raréfactions de l'air à différentes hauteurs, ne suivent point la proportion des poids dont l'air est chargé ; par conséquent les expériences du baromètre, faites au pied & sur le sommet des montagnes, ne peuvent nous donner la hauteur de l'atmosphère ; puisque ces expériences ne sont faites que dans la partie la plus inférieure de l'air. L'atmosphère s'étend bien au-delà ; & ses raréfactions s'éloignent d'autant plus de la loi précédente, qu'il est plus éloigné de la terre. C'est ce qui a engagé M. de la Hire, après Kepler, à se servir d'une méthode plus ancienne, plus simple & plus sûre pour trouver la hauteur de l'atmosphère : cette méthode est fondée sur l'observation des crépuscules.

Nous reviendrons sur la méthode des crépuscules. Le fait essentiel ici est l'inférence, à partir de la confrontation entre les mesures de pression faites à différentes altitudes sur les montagnes et des mesures de la relation entre dilatation et pression de l'air faites en laboratoire, de l'existence à grande hauteur d'un air suivant des lois différentes de celles de l'air qui nous environne directement. Ainsi, l'air hétérogène du bas et l'air élémentaire du haut ne diffèrent-ils pas seulement par leurs densités, le premier étant beaucoup plus pesant que le second du fait de son chargement en impuretés émanant de la terre, mais également par leur nature, le second s'étendant beaucoup plus haut qu'il ne le ferait s'il suivait la loi des dilatations du premier. Il faut remarquer que l'article RÉFRACTION de l'Encyclopédie ne fait plus aucune allusion au rôle des vapeurs et exhalaisons, souligné dans le DUF. Comme nous le verrons, le rôle des impuretés de l'atmosphère dans la réfraction a été infirmé au début du XVIII^{ème} siècle sur la base d'observations montrant son absence dans certaines conditions, par exemple dans le cas d'une étoile vue à travers un nuage, ce qui a conduit des savants à postuler l'existence d'une matière réfractive subtile, non pesante. On trouve une allusion à la matière réfractive dans le Furetière (RÉFRACTION, F1727) :

La cause de la réfraction n'est pas encore connue ; peut-être même ne le sera-t-elle jamais, comme beaucoup d'autres points de physique. Est-ce l'air, est-ce une matière réfractive qui est dans l'air, suivant la conjecture de M. Cassini ? Voilà où l'on en est encore sur cette matière. Beaucoup de contrariétés apparentes dans l'un ou l'autre système, & par conséquent beaucoup d'incertitudes

L'existence de la matière réfractive est loin d'être unanimement admise. Elle n'est pas mentionnée dans l'article RÉFRACTION de l'Encyclopédie.

L'article de l'Encyclopédie sur l'air consacre de longs développements aux différents « caractères » de l'air. Contrairement aux vapeurs contenues dans une bouteille qui, quand il fait froid, perdent leur élasticité et s'attachent autour des parois internes du verre, l'air ne condense pas. C'est par le moyen de l'air que les corps terrestres brûlent, tandis qu'au contraire les vapeurs et les exhalaisons éteignent le feu, les charbons et le fer ardents. Alors que par temps d'orage, les exhalaisons s'enflamment (production des éclairs), l'air reste intact après une pluie d'orage. On ne connaît pas la nature de l'air, car on ne peut examiner l'air seul et épuré des matières qui y sont mêlées. Pour certains, l'air est « *une substance sui generis, qui ne dérive d'aucune autre, qui ne peut être engendrée, qui est incorruptible, immuable, présente en tous lieux, dans tous les corps, &c.* », c'est-à-dire, par définition, un air élémentaire. Pour d'autres, l'élasticité de l'air, qui en est le caractère essentiel et distinctif, lui est conférée par la matière des corps dont il est dérivé, « *devenue par les changements qui s'y sont faits, susceptible d'une élasticité permanente* ». Cette conception est notamment celle de Robert Boyle, qui a fait de nombreuses expériences de production de l'air à partir de corps qui ne semblent pas en contenir, les meilleures méthodes à cet effet étant « *la fermentation, la corrosion, la dissolution, la décomposition, l'ébullition de l'eau & des autres fluides, & l'action réciproque des corps, surtout des corps salins, les uns sur les autres* ». Pour Newton, « *les particules d'une substance dense, compacte & fixe, adhérentes les unes aux autres par une puissante force attractive, ne peuvent être séparées que par une chaleur violente, & peut-être jamais sans fermentation ; & ces corps raréfiés à la fin par la chaleur ou la fermentation, se transforment en un air vraiment élastique* ». Alors qu'on pouvait lire dans l'article AIR du DUF-1690 que « *l'eau se résout, s'évapore en air* », l'Encyclopédie stipule que tout ce qui paraît air ne l'est pas pour cela :

[...] il ne faut que l'exemple de l'éolipile, où l'eau étant suffisamment raréfiée par le feu, sort avec un sifflement aigu, sous la forme d'une matière parfaitement semblable à l'air ; mais bientôt après perd cette ressemblance, surtout au froid, & redevient eau par la condensation, telle qu'elle était originairement. On peut observer la même chose dans l'esprit de vin, & autres esprits subtils & fugitifs qu'on obtient par la distillation ; au lieu que l'air réel ne se peut réduire ni par la compression, ni par la condensation ou autre voie, en aucune autre substance que de l'air.

On peut donc faire prendre à l'eau pour quelque temps l'apparence de l'air : mais elle reprend bientôt la sienne.

On trouve la même problématique exprimée dans l'article ÉBULLITION de l'Encyclopédie :

A l'égard de la cause de l'ébullition, nous avons rapporté historiquement au mot « Bouillir » celle que les physiciens en donnent ordinairement, & qu'ils attribuent à l'air qui se dégage des particules de l'eau ; mais d'autres physiciens rejettent cette cause, & croient que l'ébullition vient des particules de l'eau même, qui sont changées par l'action du feu en vapeur très dilatée, & qui s'élèvent du fond du vase à la surface. Voici en substance les raisons de leur opinion. 1°. L'ébullition se fait dans la machine du vide, lorsqu'on y fait chauffer de l'eau auparavant purgée d'air. Ce n'est donc point l'air qui la produit ; c'est dans ce cas la chaleur qui raréfie l'eau : ce sont les termes de M. Musschenbroeck [...] 2°. L'eau ne cesse point de bouillir qu'elle ne soit évaporée ; or comment peut-on concevoir que l'air renfermé dans l'eau, & qui en fait au plus la trentième partie, puisse suffire à toute cette ébullition ? 3°. Quoique les liqueurs ne contiennent pas toutes la même quantité d'air, toutes paraissent bouillir également. 4°. Plus l'eau est libre de s'évaporer, c'est-à-dire plus le vase dans lequel on la met est ouvert, moins elle soutient de degrés de chaleur sans bouillir. 5°. Plus une liqueur est subtile, & par conséquent facile à réduire en vapeur, moins il faut de chaleur pour la faire bouillir. Ainsi l'esprit-de-vin bout à une moindre chaleur que l'eau, & l'eau à une moindre chaleur que le mercure.

L'air est divisé « en réel ou permanent & en apparent ou passager ». Les vapeurs, produites par évaporation de l'eau, sont de l'air apparent, les exhalaisons sèches constituant de l'air permanent. Air doit être ici entendu au sens d'air grossier, ou hétérogène, mélange d'air élémentaire et d'impuretés émanant de la terre et de l'eau. La production d'air à partir des corps solides qui en paraissent dénués, est questionnée par l'auteur de l'article AIR de l'Encyclopédie :

Mais, après tout, il y a encore lieu de douter si la matière ainsi extraite des corps solides a toutes les propriétés de l'air ; si cet air n'est pas passager, ou si l'air permanent qu'on tire des corps n'y existait pas déjà. M. Boyle prouve par une expérience faite dans la Machine pneumatique avec une mèche allumée, que cette fumée subtile que le feu élève même des corps secs, n'a pas autant de ressort que l'air, puisqu'elle ne saurait empêcher l'expansion d'un peu d'air enfermé dans une vessie qu'elle environne [...] Néanmoins dans quelques expériences postérieures, en dissolvant du fer dans l'huile de vitriol & de l'eau, ou dans de l'eau-forte, il a formé une grosse bulle d'air qui avait un véritable ressort, & qui en conséquence de son ressort, empêchait que la liqueur voisine ne prit sa place ; lorsqu'on y appliqua la main toute chaude, elle se dilata aisément comme tout autre air, & se sépara dans la liqueur même en plusieurs bulles, dont quelques-unes s'élevèrent hors de la liqueur en plein air. Ibid.

Le même Physicien nous assure avoir tiré une substance vraiment élastique de plusieurs autres corps ; comme du pain, du raisin, de la bière, des pommes, des pois, du bœuf, &c. & de quelques corps, en les brûlant dans le vide, & singulièrement du papier, de la corne de cerf : mais cependant cette substance, à l'examiner de près, était si éloignée de la nature d'un air pur, que les animaux qu'on y enferme, non seulement ne pouvaient respirer qu'avec peine, mais même y mouraient plus vite que dans un vide, où il n'y aurait point eu d'air du tout.

Ainsi, la nature de l'air, son caractère premier, ou au contraire secondaire à d'autres corps dont il serait dérivé, sa ressemblance avec les substances élastiques qu'on tire des corps humides, par évaporation, ou en brûlant des corps secs, constituent au milieu du XVIII^{ème} siècle des questions non encore résolues, qui rendent la définition de l'air, et de l'atmosphère qui en est la masse, fluctuante et multiple. L'air, suivant qu'il est qualifié d'élémentaire, d'hétérogène, de permanent ou de passager, désigne des substances différentes, subtiles ou au contraire grossières, résultant ou non de la transformation d'autres matières, dont le mélange constitue l'atmosphère. Cette idée est particulièrement bien exprimée dans l'article ATMOSPHERE de l'Encyclopédie :

Un auteur moderne regarde l'atmosphère comme un grand vaisseau chimique, dans lequel la matière de toutes les espèces de corps sublunaires flotte en grande quantité. Ce vaisseau est, dit-il, comme un grand fourneau, continuellement exposé à l'action du soleil ; d'où il résulte une quantité innombrable d'opérations, de sublimations, de séparations, de compositions, de digestions, de fermentations, de putréfactions, &c. Sur la nature, la constitution, les propriétés, les usages, les différents états de l'atmosphère.

L'article ATMOSPHERE du Lexicon présente l'atmosphère comme « *la partie inférieure de l'air ou de l'éther, par laquelle notre terre est entourée de toutes parts ; et dans laquelle les vapeurs sont élevées, soit par réflexion sur la chaleur du soleil, soit forcées par le feu souterrain* ». L'allusion à l'éther doit être rapprochée de la définition que fait Robert Hooke de l'air, comme on peut le lire dans l'article AIR du Lexicon, où il est dit que celui-ci semble penser que « *l'air n'est rien d'autre qu'une sorte de teinture, ou solution, des particules terrestres et aqueuses dissoutes dans l'éther, et agitées par lui ; et, ces particules, il les suppose de nature saline* ». Ainsi, selon Hooke, l'air est un mélange d'éther et de vapeurs, et il n'existe donc pas, en tant que tel, autrement que par ces vapeurs dissoutes dans l'éther. La définition de l'atmosphère est donc cohérente, puisqu'effectivement on peut considérer que les vapeurs s'élèvent dans l'éther, tout autant que dans l'atmosphère qui est son mélange avec l'éther. Les

termes de « *réflexion sur la chaleur du soleil* » (« *reflection from the Sun's heat* ») sont surprenants, mais on peut vérifier dans l'article VAPOURS que c'est bien la chaleur du soleil qui fait évaporer l'eau et autres corps. Après cette définition, l'auteur s'attache à la question de l'effet de la pression atmosphérique, tel que démontré par Boyle à travers diverses expériences. Il cite l'expérience de deux plaques de marbre polies de trois pouces de diamètre, mises au contact l'une de l'autre, et qu'il faut, dans l'air, un poids de 80 livres pour séparer, tandis que dans le vide elles se séparent sans effort.

L'article consacre un paragraphe à la question de la hauteur de l'atmosphère, que Kepler a estimé, selon l'auteur, être de l'ordre de huit miles, soit 13 km (à partir de la réfraction de la lumière des étoiles, Kepler proposant en réalité une hauteur beaucoup plus faible de 3,6 km), mais Riccioli au moins 50 miles, soit 80 km (à partir de la durée du crépuscule). Une valeur de sept miles, soit 11 km, est attribuée par Boyle à cette hauteur, en supposant l'atmosphère homogène, de densité uniforme de la surface de la terre jusqu'au sommet de l'atmosphère. Cela n'est pas le cas, puisque l'air est dilatable, et cette hauteur doit être bien plus grande. L'auteur indique que, dans sa réponse à Linus, Boyle dit que l'atmosphère pourrait atteindre des centaines, voire des milliers de miles, dans le cas où elle ne serait pas une portion limitée de l'air, mais s'étendrait aussi haut que lui (n'en étant donc pas « *la partie inférieure* », mais la totalité). Et, si l'on s'en réfère à l'idée de Hooke d'une atmosphère formée par dissolution des vapeurs dans l'éther, étendre l'atmosphère à la totalité de l'air revient à confondre ses limites avec celles de l'éther même, dont l'extension verticale est potentiellement infinie, et c'est en ce sens qu'il faut prendre l'hypothèse faite par Boyle de hauteurs aussi considérables. L'auteur énonce la loi de dilatation de l'air et annonce une hauteur de l'atmosphère de 45 miles, soit 72 km, au-dessus de laquelle l'air doit perdre toute élasticité, et où il se trouve donc dans son état naturel, non comprimé. Cette hauteur correspond à celle qui est déduite de la durée des crépuscules et, par ailleurs, à une telle hauteur, l'air occupe 3000 fois plus de volume qu'au voisinage du sol. Sachant qu'on a pu réduire son volume 60 fois dans la machine pneumatique, il est donc susceptible d'être comprimé dans la 180000^{ème} partie de l'espace qu'il occupe au sommet de l'atmosphère, dans son état naturel.

L'article AIR du Lexicon définit l'air comme un fluide diaphane (transparent), compressible et dilatable (donc élastique), « *recouvrant l'air et la mer jusqu'à une grande hauteur au-dessus des plus hautes montagnes* ». Comme dans l'Encyclopédie, on y trouve citées comme composantes essentielles de l'air : (i) les vapeurs, au sens large de vapeurs et exhalaisons, (ii)

les matières subtiles, qu'on peut supposer provenir des corps célestes, ainsi que les vapeurs magnétiques du globe terrestre, (iii) enfin un air au sens strict, que l'on peut rapprocher de l'air « *élémentaire* » décrit dans l'Encyclopédie, et dont la principale propriété est l'élasticité, propriété que l'air pourrait être la seule substance à posséder, l'élasticité des autres corps n'étant peut-être due qu'à l'air qu'ils contiennent. Cette élasticité doit être comprise comme la réaction de l'air à toute compression exercée par l'atmosphère qui, le surplombant, pèse sur lui, ou par tout autre corps. Boyle avance que la même portion de l'air peut prendre jusqu'à 520 000 fois plus de place à certains moments qu'à d'autres. James Gregory a calculé qu'un globe d'air d'un diamètre d'un pouce, s'il est raréfié ainsi qu'il doit l'être, en vertu de la loi des dilatations, à la distance d'un demi-diamètre terrestre de la terre, remplirait toute la région planétaire comprise dans la sphère de Saturne (ce qui réconcilie l'extension verticale potentiellement infinie de l'atmosphère avec l'absence de frottement rencontré par les planètes dans leur mouvement autour du soleil).

L'auteur de l'article souligne ensuite qu'il n'est pas nécessaire de faire appel à la matière subtile pour expliquer l'élasticité de l'air, en référence probablement à ceux, comme Newton, qui font l'hypothèse que l'éther mélangé à l'air en assure l'élasticité. Il suffit d'imaginer que chaque particule d'air est un petit ressort, ainsi qu'il est également rapporté dans l'article AIR de l'Encyclopédie : « *Borelli dit, que l'air est composé de corpuscules, ou petites lames dures, flexibles, capables de ressort, & qui faisant plusieurs tours en ligne spirale, forment la figure d'un cylindre creux* ». L'auteur de l'article AIR du Lexicon expose une théorie selon laquelle ces particules seraient en rotation autour de leur axe, la vitesse de rotation, par la force centrifuge qu'elle provoque, étant responsable de la plus ou moins grande extension du ressort dont elles sont constituées. Cela pourrait notamment expliquer le fait que la chaleur dilate l'air, puisque le mouvement rapide des particules caloriques peut agir sur les particules aériennes en les faisant s'éloigner de l'axe de leur mouvement, et donc occuper plus de place. Boyle montre, dans son discours contre Linus, que « *les forces requises pour comprimer l'air varient (à peu près) en raison réciproque des espaces comprenant la même portion d'air* ». L'article AIRS WEIGHT du Lexicon, qui suit immédiatement le précédent, retrace l'histoire de la découverte du poids de l'air par Torricelli, et décrit un certain nombre d'expériences réalisées par Boyle, et d'autres.

Bien que les savants anglais reconnaissent la présence de matières subtiles dans l'atmosphère, notamment de matière magnétique (on verra que Halley fait appel à la matière magnétique pour

expliquer l'aurore boréale), ils leur accordent une moindre place que leurs homologues français, à l'exception, peut-être, de Hooke, qui suppose que l'atmosphère résulte d'une dissolution des vapeurs dans l'éther. Ce point de vue, jugé trop cartésien par l'auteur de l'article *Æther* du *Lexicon*, semble relativement marginal dans la communauté anglaise, dont la tendance générale, ainsi que nous le verrons au fil de ce chapitre, est de minimiser le rôle éventuel des matières subtiles au profit d'explications physiques privilégiant, notamment, le rôle des interactions mécaniques entre les corps.

3. Vapeurs et exhalaisons

Les mots « *vapeurs* » et « *exhalaisons* » sont abondamment utilisés dans la littérature scientifique des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle, et il faut en préciser le sens. Le DUF-1690 livre la définition suivante des vapeurs :

Parties subtiles d'un corps humide, qui forment une espèce de fumée qu'une chaleur médiocre élève, & ne peut dissiper. Les nuages, les brouillards se forment des vapeurs qui s'élèvent de la terre. Les météores ne sont que des vapeurs enflammées.

Cette définition laisse clairement entendre que les vapeurs sont une émanation des corps humides modérément chauffés. L'article FUMÉE du DUF-1690 donne une définition de la fumée :

Humidité qui s'exhale en vapeur par l'action de la chaleur, soit externe, soit interne. [...] Les bois gras, & onctueux font une fumée épaisse, noire & puante [...] Les brouillards sont des fumées que le soleil élève de la terre humide, & qu'il ne peut résoudre.

La fumée désigne sans ambiguïté une substance non transparente, qui n'est pas directement le produit de l'évaporation de l'eau, mais en est la forme condensée sous forme de gouttelettes, comme celle des brouillards ou des nuages. Par ailleurs, « *les exhalaisons nitreuses & sulfureuses sont la principale matière du tonnerre, des éclairs, & des divers autres météores qui s'engendrent dans l'air* » (*EXHALAISONS, Encyclopédie*). La chaleur modérée qui élève cette fumée ne peut la dissiper, mais il est ajouté dans le DUF-1727 que « *le soleil par sa chaleur attire les vapeurs ; résout, dissipe les vapeurs* », ce qui indique que ces vapeurs peuvent passer de leur forme de fumée à la forme de substance transparente par l'action du soleil. L'Encyclopédie précise cette notion d'élévation d'un corps liquide sous forme de vapeur :

c'est l'assemblage d'une infinité de petites bulles d'eau ou d'autre matière liquide, remplies d'air raréfié par la chaleur & élevés par leur légèreté jusqu'à une certaine hauteur dans l'atmosphère ; après quoi elles retombent, soit en pluie, soit en rosée, soit en neige, &c. Les masses formées de cet assemblage, qui flottent dans l'air, sont ce qu'on appelle nuages.

Les « bulles d'eau », telles que définies dans l'encyclopédie à l'entrée BULLE, sont de « petites boules d'eau dont l'intérieur est rempli d'air », aussi appelées « bouteilles d'eau ». On trouve à l'entrée BOUTEILLE une explication du mécanisme de formation des bulles d'eau :

Les bouteilles ou bulles d'eau sont dilatables ou compressibles ; c'est-à-dire qu'elles occupent plus ou moins d'espace, selon que l'air qu'elles renferment est plus ou moins échauffé, ou plus ou moins pressé : elles sont rondes, parce que l'air renfermé agit également au-dedans d'elles en tout sens. La tunique qui les couvre est formée des plus petites particules du fluide ; & comme ces particules sont très minces, & ne font que très peu de résistance, la bouteille crève bientôt pour peu que l'air se dilate. Le mécanisme de ces petites bouteilles, est le même que le mécanisme de celles que les enfants forment avec du savon, en soufflant au bout d'un chalumeau.

Ainsi, ces bulles d'eau sont-elles les bulles d'air recouvertes d'une fine pellicule d'eau qui se forment à la surface de l'eau lorsqu'une bulle d'air formée sous la surface vient la toucher, avant que d'éclater et libérer dans l'atmosphère l'air qu'elles contiennent. L'auteur de l'article ne mentionne pas le fait que ces bulles puissent être issues des particules d'eau elles-mêmes transformées en vapeur, et non pas de l'air, ainsi qu'il est dit dans l'article ÉBULLITION déjà cité. Il écrit encore :

Lorsqu'on a mis une liqueur sous le récipient de la machine pneumatique, & qu'on commence à pomper l'air, il s'élève à la surface de la liqueur, des bouteilles ou bulles semblables à celles qui sont produites par la pluie. Ces bouteilles sont formées par l'air qui est renfermé dans la liqueur, & qui se trouvant moins comprimé lorsqu'on a commencé à pomper l'air du récipient, se dégage d'entre les particules du fluide, & monte à la surface.

Il en arrive autant à un fluide qui bout avec violence, parce que l'air qui y est contenu se trouvant raréfié par la chaleur, cherche à s'étendre & à se mettre au large, & s'échappe avec promptitude vers la surface du fluide, où il forme des bouteilles.

L'auteur de l'article VAPEURS de l'Encyclopédie suppose donc pour la formation de celles-ci un mécanisme du type de l'ébullition, au cours duquel les bulles d'air, entourées de leur

membrane d'eau, émergeant à la surface de l'eau, s'élèvent (sans éclater), du fait de leur légèreté, « *jusqu'à un certaine hauteur dans l'atmosphère* ». L'article VAPOURS du Lexicon donne une définition quasiment identique des vapeurs, « *exhalaisons aqueuses soulevées ou par la chaleur du soleil, par la chaleur souterraine, ou par tout autre feu ou chaleur accidentels* », et s'attarde longuement sur le processus de soulèvement de ces vapeurs en se référant aux travaux de Halley en Angleterre, et Guillaume Homberg en France. Pour Halley, « *un atome d'eau dilaté à la forme d'une coquille, ou d'une bulle, dont le diamètre sera dix fois plus grand qu'avant, sera spécifiquement plus léger que l'air [moins dense] et montera aussi longtemps que le « flatus » [le principe effervescent] ou l'esprit échauffé qui le séparèrent à l'origine de la masse d'eau, continuera à le dilater au même degré. Mais ensuite, cette chaleur déclinant, et l'air devenant toujours plus froid, et spécifiquement plus léger [moins dense] ; ces vapeurs plafonneront dans une certaine région de l'air, ou sinon redescendront* ». Selon Halley, les vapeurs aqueuses dissoutes dans l'air, comme le sel l'est dans l'eau, sont plus abondantes durant la journée, du fait que le soleil chauffe l'air et accroît son pouvoir de dissolution, et sont déchargées durant la nuit en rosée, du fait du refroidissement de l'atmosphère qui n'est plus éclairée par le soleil.

Les résultats des expériences de Homberg sur l'évaporation de l'eau sont ensuite brièvement exposés. Pour lui, « *la matière ardente ou éthérée met d'abord les petites particules de l'eau en agitation, et alors se mélange elle-même avec l'eau ; mélange que nous appelons vapeurs ; celui-ci étant spécifiquement plus léger que l'air, montera en lui jusqu'à une altitude telle, que l'air y est d'une gravité relative identique à la sienne, et là il stagnera alentours, jusqu'à ce que par le mouvement des vents, ou d'autres causes, sa constitution soit rompue, et ainsi les parties aqueuses s'unissant ensemble au sein de gouttes plus grandes, il descendra en rosée, ou en pluie* ». L'auteur note la similarité entre les conclusions de Halley et de Homberg, le « flatus » de l'un étant la « matière éthérée » de l'autre. Mais Homberg a aussi fait des expériences d'évaporation sous vide à partir d'une terre humide, qui montrent que l'eau s'évapore même dans le vide, sans le concours de l'air, puisque des gouttes d'eau se forment sur la paroi interne du récipient vidé de son air. Il en conclut que l'air ne participe pas à la première phase ascensionnelle des bulles d'eau, l'eau étant projetée sur les parois par l'agitation de la matière éthérée. Ainsi, il faut supposer que le mécanisme de montée et de stabilisation des bulles d'eau, de par leur légèreté spécifique relativement à l'air ambiant, ne se produit que dans un second temps.

Cette représentation de l'évaporation, c'est-à-dire la formation de la vapeur, est dictée par la seule forme qui en soit directement observable, c'est-à-dire celle de l'ébullition. Les émanations des corps humides qui en résultent sont, là encore, désignées sous le nom de fumée, ce qui est cohérent avec la conception d'un nuage de particules (les bulles d'eau) s'élevant dans l'atmosphère. L'article ÉVAPORATION de l'Encyclopédie, comme nous le verrons, conclut au contraire à la formation d'une vapeur transparente, et qui n'est peut-être pas de l'air. Certains savants, dit l'auteur de l'article VAPEURS, utilisent aussi le mot vapeur pour désigner les fumées qu'envoient les corps secs, comme le soufre, mais Newton, et quelques autres, emploient dans ce cas plutôt le terme d'exhalaisons. Voici comment sont définies les exhalaisons dans le DUF-1690 :

En termes dogmatiques, se dit particulièrement de des corps secs & menus atomes que la terre pousse continuellement en l'air, ou que les astres attirent. Les vapeurs s'élèvent des eaux, & les exhalaisons de la terre : ce sont des parties grasses, oléagineuses & sulfurées qui servent de matière aux foudres & à quelques autres météores.

Le DUF-1727 ajoute aux « corps secs ou atomes », « ces particules sulfureuses qui ont été séparées des corps terrestres par la chaleur du soleil ou par l'agitation de la matière subtile ». L'Encyclopédie définit les exhalaisons comme « fumée ou vapeur qui s'exhale ou qui sort d'un corps, & qui se répand dans l'air », et distingue clairement vapeurs et exhalaisons :

Les mots d'exhalaison & de vapeur se prennent d'ordinaire indifféremment l'un pour l'autre ; mais les auteurs exacts les distinguent. Ils appellent vapeurs, les fumées humides qui s'élèvent de l'eau & des autres corps liquides ; & exhalaisons, les fumées sèches qui viennent des corps solides, comme la terre, le feu, les minéraux, les soufres, les sels, &c.

Les exhalaisons, prises dans ce dernier sens, sont des corpuscules ou écoulements secs, qui s'élèvent des corps durs & terrestres, soit par la chaleur du soleil, soit par l'agitation de l'air, soit par quelque autre cause

L'article EXHALATION du Lexicon, très bref, fournit une définition analogue : « est tout ce qui est soulevé de la surface de la terre ou de l'eau par le moyen de la chaleur du soleil, celle des feux souterrains, &c. tel vapeurs, brumes, brouillards, &c. ». On note que les vapeurs sont ici considérées comme un cas particulier des exhalaisons, et qu'aucune distinction du type de celle proposée par l'Encyclopédie n'est faite entre vapeurs et exhalaisons.

L'action par laquelle on fait exhaler l'humidité des corps est l'évaporation, nous dit le TUF-1690 dans l'article ÉVAPORATION. Par exemple, « *le sel se forme par l'évaporation de l'humidité, soit par l'ardeur du soleil, comme dans les marais salants ; soit par le moyen du feu, comme aux lieux où il y a des puits salés* ». Le TUF-1727 ajoute qu'en chimie, l'évaporation, c'est-à-dire la dissipation de l'humidité superflue, diffère de l'exhalation, qui ne se pratique que sur des matières sèches, suivant la même distinction qui a été faite entre vapeurs et exhalaisons. On trouve dans l'Encyclopédie la définition suivante de l'évaporation :

Presque tous les corps liquides & la plupart des solides exposés à l'air, par l'action de ce fluide seul, ou aidée d'une chaleur modérée, s'élèvent peu à peu dans l'atmosphère, les uns totalement, d'autres seulement en partie : ce passage, ou cette élévation totale ou partielle des corps dans l'atmosphère, les Physiciens l'appellent évaporation.

Ainsi, la présence de l'air, qui permet à une matière plus légère de s'y élever, éventuellement aidé par l'action de la chaleur, est la condition de l'évaporation. Suite à celle-ci :

Les corps élevés dans l'air par l'évaporation, s'y soutiennent dans un tel état, qu'ils sont absolument invisibles, jusqu'à ce que par quelque changement arrivé dans l'atmosphère, leurs particules se réunissent en de petites masses qui troublent sensiblement la transparence de l'air : par exemple, l'air est (comme nous le ferons voir dans la suite) en tout temps plein d'eau qui s'y est élevée par évaporation, & y demeure invisible jusqu'à ce que de nouvelles circonstances réunissent ses molécules dispersées, en de petites masses qui troublent sensiblement sa transparence. C'est ce qui distingue l'évaporation de l'élévation dans l'atmosphère de certains corps petits & légers, tels que la poussière, qui ne s'y élèvent & ne s'y soutiennent que par l'impulsion mécanique de l'air agité, qui conservent dans l'air leur même volume, leur opacité, & retombent dès que l'air cesse d'être agité.

La matière en cours d'évaporation est donc invisible, et ne peut être comparée à la fumée à laquelle sont assimilée les vapeurs dans l'article du même nom, ainsi que nous l'avons vu. C'est la réunion ultérieure des molécules dispersées au sein de l'air en petits amas de matière qui est responsable de l'apparition d'une matière opaque, telle que celle des brouillards ou des nuages. L'évaporation est clairement distinguée du soulèvement de particules préexistantes, en cela qu'elle procède d'une opération de décomposition d'un corps liquide, ou solide. La notion d'évaporation est étendue à « *l'élévation de certains corps dans l'atmosphère, produite par un degré de chaleur suffisant pour les décomposer, ou par l'ustion [la calcination] même* ». « *Les particules élevées par ces moyens dans l'air, sont de la même nature que celles qui s'y élèvent par l'évaporation ; elles s'y soutiennent aussi dans un tel état de division, qu'elles sont*

parfaitement invisibles ». L'auteur donne l'exemple du soufre qui en brûlant se décompose, et relâche « *l'acide vitriolique [l'acide sulfurique] & le principe inflammable [la matière du feu, ou matière ignée]* » qui « *s'élèvent dans l'atmosphère & y deviennent invisibles* », ainsi que celui de la décomposition des matières animales et végétales par laquelle « *il se dégage des principes volatiles, propres à s'élever & se soutenir dans l'atmosphère* ». Le terme d'évaporation est ainsi généralisé, ce qui revient à mettre les vapeurs (au sens littéral, produits de l'évaporation) au même plan que les exhalaisons relâchées par les matières sèches :

Par ces exemples il est clair que l'évaporation ne diffère point essentiellement de l'élévation des particules volatiles dégagées par l'application d'une chaleur suffisante, pour décomposer les corps, ou par l'ustion ; que ces opérations ne font que disposer les corps à l'élévation de certaines de leurs parties ; qu'au reste les particules qui s'élèvent dans l'air par cette voie, sont de la même nature, & s'y soutiennent de même que celles qui s'y élèvent par évaporation : cependant l'usage a voulu qu'on n'appelât point évaporation, l'élévation des particules détachées par ces opérations qui décomposent les corps ; il a restreint la signification de ce mot à l'élévation des parties volatiles libres & dégagées de principes qui puissent les fixer, & qui pour s'élever dans l'atmosphère, ou ne demandent aucune chaleur artificielle, ou demandent seulement une chaleur modérée, qui n'excède guère celle de l'eau bouillante.

Il faut comprendre ici en quoi l'action de la chaleur, et la présence de l'air, permettent l'évaporation des parties volatiles des corps, qu'il s'agisse d'eau, d'air, du principe inflammable, ou de molécules de nature terreuse, celles-ci n'acquérant la propriété de s'élever dans l'air « *qu'autant qu'elles contractent une union intime avec des molécules d'eau* ». Le principe inflammable lui-même, c'est-à-dire la matière du feu (ou ignée), quoique ses molécules soient à l'état libre très déliées, est fixé si fortement dans les corps, où il n'est pas combiné à l'eau, qu'il n'est pas propre à s'évaporer de lui-même. Par contre, combinées avec les molécules d'eau, les molécules ignées rendent l'évaporation de celles-ci beaucoup plus rapide. Et voici ce que nous dit l'auteur de l'article du mécanisme de l'évaporation, tel qu'il est couramment admis :

Les corps susceptibles d'évaporation s'évaporent d'autant plus rapidement, qu'ils sont plus échauffés. C'est sans doute cette observation toute simple qui a donné lieu à l'hypothèse la plus généralement adoptée, sur le mécanisme de l'évaporation. On a supposé que les molécules d'eau étant raréfiées par la chaleur, ou, ce qui revient au même, par l'adhésion des particules ignées, leur pesanteur spécifique diminuait à tel point que les molécules, devenues plus légères que l'air, pouvaient s'élever dans ce

fluide, jusqu'à ce qu'elles fussent parvenues à une couche de l'atmosphère, dont la pesanteur spécifique fût égale à la leur.

Nous avons vu que c'est l'explication que donnent Halley, et Homberg, de la formation des vapeurs. Ainsi, c'est l'adjonction des particules ignées aux molécules d'eau, se traduisant par le chauffage de ces molécules et leur raréfaction, qui résulte dans leur évaporation, au sein d'un air plus pesant qu'elles. L'auteur de l'article, sur le constat que « *la glace s'évapore même dans les froids les plus rigoureux* », et également que les particules condensées (les nuages) ne sont pas plus basses l'hiver que l'été, rejette cette explication de l'évaporation par l'effet des particules ignées rendant les molécules d'eau plus légères que celles de l'air. Son explication est que l'eau se dissout dans l'air, comme le sel se dissout dans l'eau. Sa dissolution dans l'air rend l'eau invisible, comme il en va du sel dans l'eau. Il considère donc l'air comme un solvant, d'autant plus efficace à dissoudre l'eau qu'il est échauffé, notamment par les vapeurs elles-mêmes au contact du corps évaporable. À l'objection qui est faite à sa théorie, à savoir que l'évaporation se produit aussi dans le vide, il répond :

Suivant les expériences de quelques physiciens, l'eau s'évapore dans le vide ; elle peut donc s'élever sans le secours de l'air, sans y être soutenue, comme je l'ai dit dans l'état de dissolution. Mais si le physicien avait fait attention que l'eau contient une quantité immense d'air dont on ne peut la purger entièrement, & qu'elle ne peut s'évaporer sans que l'air qu'elle contient se développe, il aurait aisément remarqué que cette objection renferme un paradoxe, & qu'il est impossible qu'un espace contenant de l'eau qui s'évapore, reste parfaitement vide d'air.

Il règne donc encore, au milieu du XVIII^{ème} siècle, un flou quant à la nature exacte des vapeurs et des exhalaisons, dont les mécanismes de production ne sont pas bien compris. Il ressort de l'analyse précédente qu'il ne faut pas prendre le mot « *vapeur* », tel qu'on l'utilise dans la première partie du XVIII^{ème} siècle, au sens de vapeur d'eau (ou de vapeur de liquide en général) sous sa forme gazeuse, mais plutôt de petites particules d'eau (ou de liquide) s'élevant dans l'atmosphère à partir de l'eau terrestre, ou de tout autre liquide, qui s'évapore. Ces particules, plus légères que l'air, s'élèvent dans l'atmosphère jusqu'au niveau où elles sont en équilibre avec lui, et peuvent y être transportées par le vent. Elles peuvent également conduire à la formation de brouillards ou de nuages. L'article NUÉE du DUF-1727 dit à ce sujet : « *Comme les vapeurs subtilisées & raréfiées sont la matière des vents, aussi les vapeurs resserrées & condensées forment les nuées & la pluie ; de là vient que la pluie abat & apaise ordinairement*

le vent ». Les nuées (dont les nuages sont des formes localisées) s'élèvent à différentes hauteurs, comme le dit l'article NUÉES de l'Encyclopédie :

Les nuées s'élèvent dans notre atmosphère à différentes hauteurs. On en voit quelquefois qui sont suspendues les unes au-dessus des autres, & qui paraissent fort distinctes, ce qui dépend surtout de la différence de leur pesanteur spécifique [leur densité], qui les tient en équilibre avec un air plus ou moins dense. On connaît qu'elles sont suspendues les unes au-dessus des autres par les différentes routes qu'elles prennent, étant portées les unes plus haut, les autres plus bas, sans se mêler ensemble. Il paraît que les plus hautes nuées s'élèvent rarement au-dessus de la hauteur du sommet des plus hautes montagnes ; car on voit ordinairement de loin, que ces sommets s'élèvent au-dessus des nuées. 2°. Nous apprenons de divers observateurs qui ont été sur les plus hautes montagnes, qu'ils ont toujours vu les nuées flotter au-dessous d'eux, sans avoir jamais remarqué qu'elles se trouvassent au-dessus de leurs têtes. Riccioli a calculé que les plus hautes nuées ne s'élèvent jamais à la hauteur de 5000 pas. Peut-être y a-t-il cependant quelques exhalaisons subtiles qui montent beaucoup plus haut.

Quant à la dissipation des nuées, elle s'opère par la pluie, mais pas uniquement. Elles peuvent également se disloquer sous l'effet du vent, ou bien se dissoudre dans l'air à proportion de la pureté de cet air quand elles s'élèvent dans l'atmosphère du fait d'une augmentation locale de la pression :

Il arrive assez souvent qu'elles se mettent en pièces, & se dispersent de telle manière qu'elles disparaissent entièrement : de-là vient que le ciel est quelquefois serein & clair, lors même qu'il fait une violente tempête.

Les nuées se dissipent aussi, lorsque l'air dans lequel elles sont suspendues, devient plus pesant, car elles sont alors obligées de s'élever plus haut, pour être en équilibre avec un air plus raréfié, & alors à mesure qu'elles montent à travers un air plus pur, qui en dissout quelques parties avec lesquelles il se mêle, elles diminuent & se dissipent insensiblement.

Les vapeurs s'élevant des corps humides, et les exhalaisons qui en sont l'équivalent appliqué aux corps secs, produits respectivement de l'évaporation et de l'exhalaison, sont donc des substances assez mal définies, plutôt de nature particulière que gazeuse dans l'esprit des savants de l'époque, bien que la nature gazeuse soit correctement aperçue par certains d'entre eux dans le processus de l'évaporation. Le caractère particulier supposé des vapeurs, qualifiées de fumée, constitue un héritage de la vision aristotélicienne, qui attribue aux vapeurs, et non à l'air, la capacité de réfracter la lumière et agrandir la lune, ainsi que l'eau agrandit par réfraction l'image du bâton qui y est plongé. Les vapeurs sont, dans cette analogie, assimilées à l'eau

(liquide) plutôt qu'à l'air (gazeux). On parlera généralement de vapeurs et d'exhalaisons pour désigner l'ensemble des émanations marines et terrestres présentes dans l'atmosphère, qui ne sont pas nécessairement transparentes à la lumière, comme nous l'avons détaillé. Le mot vapeur sera dans certains cas utilisé pour qualifier l'ensemble des émanations, exhalaisons comprises.

4. Matières grossières et subtiles

A côté des vapeurs et exhalaisons, nous avons vu que l'air hétérogène contient un autre type de substance, à savoir « *la matière de la lumière ou du feu, qui émane perpétuellement des corps célestes. A quoi quelques Physiciens ajoutent les émanations magnétiques de la terre, vraies ou prétendues* ». Ces matières subtiles, dont il existe de nombreux autres genres, jouent un rôle fondamental dans la représentation de l'atmosphère au XVIII^{ème} siècle, comme nous le verrons au fil des chapitres qui leur sont consacrés. Mais il faut d'abord définir ce qu'est à l'époque la matière au sens le plus général. On trouve une définition de la matière dans le DUF-1690 :

Premier principe : substance dont le mélange, ou la liaison compose tous les corps naturels [...] La matière céleste est très subtile, & liquide : elle tourne, & emporte avec elle les globes des Planètes [...].

La matière première est celle qu'on conçoit en faisant abstraction de toutes ses différentes formes. [...]

L'étendue, la divisibilité, la figure, & l'impenétrabilité sont des propriétés essentielles à la matière. L'étendue se conçoit avant les trois autres, & par conséquent l'étendue est ce qui constitue l'essence de la matière. Il est certain que l'idée de l'étendue est inséparable de la matière : & dès que l'on ne conçoit point d'étendue, il ne reste aucune idée de la matière. ROH. On dispute si la matière est divisible à l'infini. La subtilité des Philosophes a rendu la question problématique. Rohault tient pour la divisibilité de la matière à l'infini.

La matière céleste dont il est question est l'éther. La matière, caractérisée par ses quatre propriétés, dont celle qui prédomine est selon les cartésiens l'étendue, est un principe premier, une substance qui entre dans la composition de tous les corps naturels. La question de sa divisibilité, qui oppose cartésiens et atomistes, est jugée problématique. La seule addition à cette définition figurant dans le DUF-1727 concerne le mouvement : « *Quelques-uns ont soutenu que le mouvement est essentiel à la matière, & que toutes ses parties ont été toujours en mouvement, & ne peuvent pas être autrement* ». L'Encyclopédie donne la définition suivante de la matière, qui inclut effectivement la notion de mouvement sous le terme de mobilité :

substance étendue, solide, divisible, mobile & passible, le premier principe de toutes les choses naturelles, & qui par ses différents arrangements & combinaisons, forme tous les corps.

La prééminence de l'étendue est remise en question par certains auteurs, comme Samuel Clarke, car « *si l'étendue était l'essence de la matière, & que par conséquent la matière & l'espace ne fussent qu'une même chose, il s'ensuivrait de là que la matière est infinie & éternelle, que c'est un être nécessaire, qui ne peut être ni créé ni anéanti ; ce qui est absurde* ». Ainsi, dans la conception newtonienne de Clarke, c'est l'impénétrabilité qui constitue l'essence de la matière :

il paraît, soit par la nature de la gravité, soit par les mouvements des comètes, soit par les vibrations des pendules, &c. que l'espace vide & non résistant est distingué de la matière, & que par conséquent la matière n'est pas une simple étendue, mais une étendue solide, impénétrable, & douée du pouvoir de résister.

Concernant la matière en tant que principe premier, certains pensent que la matière, quand elle a été créée, a été divisée en plusieurs ordres de corpuscules différant les uns des autres en substance, en dureté, en figure etc..., les diverses combinaisons de ces corpuscules résultant dans la variété des corps et de leurs caractéristiques. D'autres, comme Newton, considèrent que cette variété résulte des « *différents arrangements d'une même matière, qu'il croit homogène & uniforme dans tous les corps* ». Selon Newton, tous les corps, même les plus volatils, et jusqu'à la lumière, sont composés de parties dures, la dureté étant aussi essentielle que l'impénétrabilité. On le voit à la dureté de certains corps poreux, qui laisse supposer que leurs parties simples, dénuées de pores, sont encore bien plus dures. Il faudrait une force bien moindre pour séparer les parties dures d'un corps poreux les uns des autres, qu'il n'en faudrait pour rompre un corpuscule solide sans pores. La force qui, selon Newton, tient les corpuscules durs au contact les uns des autres dans un corps poreux, « *force qui est plus grande dans le point de contact que partout ailleurs, & qui décroît ensuite si promptement, qu'elle n'est plus sensible à une très petite distance* », est l'attraction gravitationnelle, responsable de la cohésion des corps naturels.

Les cartésiens, qui n'acceptent pas l'existence du vide, donnent à cette matière particulière « *qu'ils supposent traverser & pénétrer librement les pores de tous les corps, & remplir ces*

pores de façon à ne laisser aucun vide ou interstices entre eux » le nom de « matière subtile ».
Mais, nous dit l'auteur de l'article à propos des cartésiens :

en vain ils ont recours à cette machine pour étayer leur sentiment d'un plein absolu, & pour le faire accorder avec le phénomène du mouvement, &c. en un mot, pour la faire agir & mouvoir à leur gré. En effet, s'il existait une pareille matière, il faudrait pour qu'elle dût remplir les vides de tous les autres corps, qu'elle fût elle-même entièrement dépourvue de vide ; c'est-à-dire parfaitement solide, beaucoup plus solide, par exemple que l'or, & par conséquent, qu'elle fût beaucoup plus pesante que ce métal, & qu'elle résistât davantage [...] ; ce qui ne saurait s'accorder avec les phénomènes.

Par « *les phénomènes* », l'auteur entend le mouvement des planètes et des autres corps, qui se fait sans résistance mesurable, au sein de l'espace planétaire. Bien que Newton ne partage pas le point de vue des cartésiens sur la non-existence du vide, il convient néanmoins de l'existence d'une matière subtile, non pas pour emplir la totalité des espaces vides, mais pour transmettre par ses vibrations la chaleur et la lumière, à la fois donc matière calorique et matière lumineuse. La matière subtile de Newton est beaucoup plus déliée que l'air, et pénètre les corps les plus denses :

Il déduit l'existence de cette matière des expériences de deux thermomètres renfermés dans deux vaisseaux de verre, de l'un desquels on a fait sortir l'air, & qu'on porte tous deux d'un endroit froid en un endroit chaud. Le thermomètre qui est dans le vide devient chaud, & s'élève presque aussitôt que celui qui est dans l'air, & si on les reporte dans l'endroit froid, ils se refroidissent, & s'abaissent tous deux à peu près au même point. Cela ne montre-t-il pas, dit-il, que la chaleur d'un endroit chaud se transmet à travers le vide par les vibrations d'un milieu beaucoup plus subtil que l'air, milieu qui reste dans le vide après que l'air en a été tiré ? & ce milieu n'est-il pas le même qui brise & réfléchit les rayons de lumière ? [...]

Le même philosophe parle encore de ce milieu ou fluide subtil, à la fin de ses principes. Ce fluide, dit-il, pénètre les corps les plus denses ; il est caché dans leur substance ; c'est par sa force & par son action que les particules des corps s'attirent à de très petites distances, & qu'elles s'attachent fortement quand elles sont contiguës ; ce même fluide est aussi la cause de l'action des corps électriques, soit pour repousser, soit pour attirer les corpuscules voisins.

Ainsi, Newton attribue-t-il également à cette matière subtile, transmettant chaleur et lumière, l'attraction de la matière, qu'elle soit gravitationnelle, ou de nature électrique. L'auteur de l'article note la contradiction entre le premier point de vue de Newton, qui est de considérer l'attraction gravitationnelle comme une propriété de la matière, et l'attribution qu'il fait de la

cohésion des corps à la matière subtile, ce qui traduit assurément son peu de certitude quant à l'existence de la matière subtile, position qui serait plutôt une concession faite aux cartésiens. D'autant que Newton a également soutenu, non sans hésitations, l'hypothèse cartésienne de la matière magnétique pour expliquer les propriétés de l'aimant. Toujours est-il que cartésiens et newtoniens se rencontrent sur l'affirmation, plus ou moins nuancée, et basée sur des arguments différents, de l'existence d'une matière subtile emplissant le monde.

Une autre matière subtile est la matière ignée, ou matière du feu. L'Encyclopédie en donne la définition suivante :

principe que quelques chimistes emploient dans l'explication de plusieurs effets, surtout pour rendre raison de l'augmentation de poids que certains corps éprouvent dans la calcination.

L'auteur donne l'exemple de vingt livres de plomb qu'on fait fondre sur le feu jusqu'à ce qu'il soit réduit en poussière. La poudre de plomb qui en résulte est augmentée en volume et pèse vingt-cinq livres. L'augmentation de poids ne vient pas de résidus du bois ou du charbon utilisé pour entretenir le feu, comme le montre la même expérience réalisée au foyer d'un verre ardent, une lentille convexe placée sous le soleil.

On a donc conclu que cette augmentation de poids ne pouvait procéder que des rayons du soleil qui se sont concentrés dans la matière exposée à leur action pendant tout le temps que dure l'opération, & que c'était à la matière condensée de ces rayons de lumière qu'il fallait attribuer l'excès de pesanteur qu'on y observait ; & pour cet effet on a supposé que la matière qui sert à nous transmettre la lumière & la chaleur, l'action du soleil ou du feu, était pesante, qu'elle était capable d'une grande condensation, qu'elle se condensait en effet prodigieusement dans les pores de certains corps, sans y être contrainte par aucun poids ; que la chaleur, qui raréfie universellement toutes les autres matières, avait néanmoins la propriété de condenser celle-ci, & que la teneur des corps calcinés, quoique très faible, avait nonobstant cela la force de retenir une matière qui tend à s'étendre avec une telle force, qu'une livre de cette matière contenue dans les pores de cinq livres de plomb, étant dans son état naturel, devait nécessairement occuper un espace immense, puisque la pesanteur de cette matière, dans son état naturel, est absolument insensible.

Mais cette explication, qui fait appel à la matière subtile transmettant lumière et chaleur, ne tient pas, selon l'auteur, car nous avons des preuves du fait que la matière de la lumière n'est pas pesante. Ainsi, la matière de la lumière qui se trouve dans une enceinte de verre où l'on a fait le vide, dont la présence est attestée par le fait qu'on continue à voir les objets situés derrière

l'enceinte à travers elle, ne tient pas le mercure suspendu dans le baromètre à la moindre hauteur. Ou encore la lumière n'oppose aucune résistance perceptible à un globe qui la traverse, contrairement à un fluide présentant une certaine densité. Il faut donc chercher ailleurs la matière responsable de l'accroissement de masse du plomb. Et c'est dans les vapeurs et exhalaisons dissoutes dans l'air (concept dont on a vu qu'il est utilisé pour expliquer l'évaporation des corps), et qui sont donc contenues dans ses pores, qu'on doit nécessairement la trouver :

Selon les remarques très détaillées de M. Boerhaave, l'air contient dans ses pores un grand nombre de molécules pesantes, de l'eau, de l'huile, des sels volatils, &c. A l'égard de l'eau, on sait de quelle façon, quelque quantité que ce soit de sel de tartre, exposé à l'air, se charge en fort peu de temps d'un poids égal de molécules d'eau. Cette matière pesante est donc contenue dans les pores de l'air. La présence des molécules de soufre, de sels, &c. n'est pas plus difficile à constater. Sans recourir à aucun alambic, on n'a qu'à se trouver en rase campagne dans un temps d'orage, y lever les yeux au ciel pour y voir ce grand nombre d'éclairs qui brillent de toutes parts : ce sont des feux, ce sont des soufres allumés, ce sont des sels volatils, personne n'en peut disconvenir

A l'objection selon laquelle l'huile ne s'évapore pas, et ne se mêle que très difficilement à l'air, Herman Boerhaave répond que c'est précisément parce que l'air contient beaucoup d'huile dans ses pores qu'il ne peut en accepter davantage. Il imagine que l'action du feu sur l'air environnant expulse les molécules d'eau des pores de l'air, et que l'espace laissé vacant par ces molécules libère les matières plus denses qui s'y trouvaient confinées, celles-ci, de par leur pesanteur, venant se joindre aux molécules du plomb. Il fournit une estimation chiffrée de l'accroissement de poids résultant de la combustion du plomb par analogie avec le processus de formation du tartre :

Quelle impossibilité y a-t-il donc, après qu'on a vu que l'air pouvait fournir facilement vingt livres d'eau à vingt livres de sel de tartre, & qu'il les leur fournissait en effet en peu de temps, que le même air puisse fournir à vingt livres de plomb pendant tout le temps que dure la calcination, je ne dis pas vingt livres de molécules d'eau, que l'action du feu éloigne & chasse des pores de l'air, qui environne le vase dans lequel on calcine le plomb, mais seulement cinq livres de molécules de matières plus denses, plus pesantes, & en même temps plus subtiles, qui étaient contenues dans les pores de l'air parmi ces mêmes molécules d'eau, lesquelles n'étant plus soutenues dans ces pores par les molécules de cette eau, que le feu en a éloigné, se dégageront des pores de l'air par leur propre pesanteur, viendront se joindre aux molécules du plomb, dont elles augmenteront le poids & le volume.

Le volume d'air qui a fourni la matière qui vient s'incorporer au plomb, s'allégeant de ce fait, monte et cède sa place à un nouvel air, « *si bien qu'en fort peu de temps toutes les parties de l'air contenu dans un grand espace, pourront par cette mécanique simple & intelligible, s'approcher successivement l'une après l'autre du plomb que l'on calcine, & déposer les molécules pesantes que cet air contient dans ses pores* ». Ainsi, la matière ignée n'est pas, en elle-même, responsable de l'augmentation de poids du plomb. C'est par son mouvement qu'elle provoque la désunion des parties du plomb, chasse l'eau des pores de l'air, et permet aux matières denses de s'évader des pores de l'air et venir au contact des molécules de plomb : « *le feu, ou les rayons de lumière, réunis au foyer d'une loupe, ne fournissent ici qu'un grand mouvement qui désunit les parties du métal, en calcinant les souffres, qui les lient entre elles, & laissent aux particules pesantes, qui viennent des pores de l'air, & qui n'ont pas la même viscosité, la liberté d'environner les molécules du plomb, & de réduire ce métal en poudre* ».

5. Le triptyque chaleur, feu, lumière

5.1 La chaleur

La chaleur est définie dans le DUF-1690 comme le « *sentiment qui résulte de l'action & du mouvement des petits atomes de feu qui sont dans les corps, quand ils agissent sur les autres* », et également comme « *la propre substance du feu, en tant qu'il y en a plusieurs atomes ou parties ensemble qui se répandent aux environs pour causer le sentiment de chaleur* ». Un ajout d'importance est fait dans l'édition de 1727, à savoir qu'elle « *est d'autant plus violente, que ces corpuscules [les atomes du feu] sont en plus grand nombre, & plus agités* ». Pour l'Encyclopédie, la chaleur « *est une des qualités première des corps, & celle qui est opposée au froid* », mais aussi « *un être physique dont on connaît la présence & dont on mesure le degré par la raréfaction de l'air, ou de quelque liqueur renfermée dans un thermomètre* », et encore une sensation, mais « *relative* » en cela qu'elle « *ne doit être considérée que relativement à l'organe du toucher, puisqu'il n'y a point d'objet qui nous paroisse chaud, à moins que sa chaleur n'excède celle de notre corps* ». Quant à la nature exacte de la chaleur qui est dans les corps, « *les uns prétendent que c'est une qualité ; d'autres, que c'est une substance ; & quelques-uns, que c'est une affection mécanique* » :

Nos derniers & meilleurs auteurs en Philosophie mécanique, expérimentale, & chimique, pensent fort diversement sur la chaleur. La principale question qu'ils se proposent, consiste à savoir si la chaleur

est une propriété particulière d'un certain corps immuable appelé feu ; ou si elle peut être produite mécaniquement dans d'autres corps en altérant leurs parties.

Boerhaave est partisan de la première hypothèse. Pour lui, « *ce que nous appelons feu est un corps par lui-même, sui generis, qui a été créé tel dès le commencement, qui ne peut être altéré en sa nature ni en ses propriétés, qui ne peut être produit de nouveau par aucun autre corps, & qui ne peut être changé en aucun autre, ni cesser d'être feu* ». Pour lui, le feu est présent partout, dans toutes les parties de l'espace et des corps, mais il reste caché et imperceptible, et ne se découvre que par certains effets qu'il produit, comme « *la chaleur, la lumière, les couleurs, la raréfaction & la brûlure* ». Les corps lumineux, tels que le soleil, le feu ordinaire, ou les lampes, « *ne lancent point de feu tiré de leur propre substance* », mais « *dirigent & déterminent les corpuscules de feu qui [étant partout présents] les environnent, à se former en rayons parallèles* ». Cette action de collection du feu se fait en « *poussant une suite infinie d'atomes ignés vers le même endroit, ou le même corps, de sorte que chaque atome porte son coup, & seconde l'effort de ceux qui l'ont précédé* ». Une deuxième façon de collecter le feu consiste « *à l'amasser purement & simplement dans un espace plus étroit ; ce qui se fait en frottant avec vitesse un corps contre un autre* ». Ce frottement doit se faire à grande vitesse, de telle manière que seules les particules du feu flottant dans l'air du voisinage soient assez mobiles pour se glisser dans les places vides laissées autour des corps frottés, s'y amasser, et former « *une espèce d'atmosphère de feu* ». « *C'est ainsi que les essieux des roues de charrettes & des meules, les cordages des vaisseaux, &c. reçoivent de la chaleur par le frottement, prennent feu, & jettent souvent de la flamme* ». Guillaume Homberg, Willem Jacob's Gravesande et Nicolas Lemery sont de cet avis.

Partisans de la deuxième hypothèse, Francis Bacon, Robert Boyle et Isaac Newton « *ne [...] conçoivent point [la chaleur] comme une propriété originellement inhérente à quelque espèce particulière de corps, mais comme une propriété que l'on peut produire mécaniquement dans un corps* ». Boyle soutient que le chaud peut être produit par une action mécanique, par exemple dans un morceau de fer battu vivement avec un marteau, la cause de la chaleur étant dans « *la force du mouvement du marteau, qui imprime dans les petites parties du fer une agitation violente & diversement déterminée* ». Le morceau de fer devient d'abord chaud par rapport à d'autres corps en comparaison desquels il était froid auparavant, puis devient chaud sensiblement, quand l'agitation imprimée par le marteau est plus forte que celle des parties des doigts qui le tiennent, le marteau et l'enclume pouvant continuer d'être froid pendant

l'opération. Le caractère relatif de la chaleur effectivement ressentie est indissociable de cette conception d'une chaleur communiquée par l'action mécanique, celle-ci n'existant que par comparaison avec la chaleur de corps n'étant pas soumis à la même action mécanique. Le fait que le marteau reste froid montre que ce n'est pas en communiquant sa chaleur qu'il chauffe le morceau de métal. Un corps peut donc fournir de la chaleur sans être chaud lui-même.

Une preuve, dit le même auteur [Boyle], que la chaleur peut être produite mécaniquement, c'est qu'il n'y a qu'à réfléchir sur sa nature, qui semble consister principalement dans cette propriété mécanique de la matière, que l'on appelle mouvement : mais il faut pour cela que le mouvement soit accompagné de plusieurs conditions ou modifications.

En premier lieu, il faut que l'agitation des parties du corps soit violente ; car c'est là ce qui distingue les corps qu'on appelle chauds, de ceux qui sont simplement fluides [...].

Une autre condition est que la détermination du mouvement soit diversifiée, & qu'elle soit dirigée en tout sens [...].

Ce système est poussé plus loin par Newton. Il ne regarde pas le feu comme une espèce particulière de corps doué originairement de telle & telle propriété ; mais selon lui le feu n'est qu'un corps fortement igné, c'est-à-dire chaud & échauffé au point de jeter une lumière abondante. Un fer rouge est-il autre chose, dit-il, que du feu ? Un charbon ardent est-il autre chose que du bois rouge & brûlant ?

Selon Newton, les corps fixes échauffés à un degré considérable émettent une lumière, et cette émission se fait par la vibration de leurs parties. Les corps riches en « *parties terrestres & sulfureuses* » deviennent lumineux quand ces parties sont agitées, soit par l'application d'un feu extérieur, soit par friction, percussion ou putréfaction :

Ainsi l'eau de la mer dans une tempête, le vif-argent agité dans le vide, le dos d'un chat ou le col d'un cheval frottés à contre-poil dans un lieu obscur, du bois, de la chair & du poisson pendant qu'ils se putréfient, les vapeurs qui s'élèvent des eaux corrompues & qu'on appelle communément feux follets, les tas de foin & de blé moites, les vers luisants, l'ambre & le diamant quand on les frotte, l'acier battu avec un caillou, &c. jettent de la lumière.

L'article HEAT du Lexicon fournit des informations complémentaires sur l'approche des savants anglais. La chaleur y est définie comme « *l'une des quatre qualités primaires, et semble consister seulement, ou du moins principalement, dans le mouvement local des petites parties d'un corps mécaniquement modifié par certaines conditions, desquelles la principale est l'agitation véhémement et variée de ces petites parties insensibles* ». La question de l'existence,

ou non, d'un corps immuable appelé feu, qui produirait la chaleur, n'est pas posée. L'auteur de l'article donne trois conditions à la production de la chaleur. La première est que les petites parties soient agitées avec un degré de violence et de rapidité supérieur à celui nécessaire pour produire la fluidité. La seconde est que cette agitation violente soit également variée, les particules devant bouger dans toutes les directions. La troisième condition est que les particules agitées violemment et dans tous les sens, soient suffisamment petites pour être individuellement insensibles. Car, à moins qu'elles ne soient extrêmement fines et subtiles, elles ne peuvent pénétrer facilement dans les pores des corps contigus, et ainsi les chauffer ou les brûler. Cette définition est évidemment parfaitement en ligne avec ce que l'Encyclopédie nous révèle des conceptions de Newton ou de Boyle relativement à la production mécanique de la chaleur.

Une intéressante partie du même article HEAT du Lexicon concerne la relation entre chaleur et feu. Il est dit que Newton, à la fin de son Optique, conjecture « *que la flamme est une fumée, ou une exhalaison chauffée au rouge ; c'est-à-dire assez chaude pour briller : parce que les corps ne brûlent pas sans émettre une fumée copieuse, et cette fumée brûle dans la flamme* ». L'auteur parle du feu follet, une vapeur qui brille sans chaleur, « *et il semble y avoir la même différence entre cette vapeur et la flamme, qu'entre le bois pourri luisant sans chaleur, et les charbons ardents du feu* ». Cet exemple semble destiné à montrer que la lueur du feu follet n'est pas une flamme, l'absence, autant d'une fumée que d'une flamme, devant être opposée à la présence, à la fois de la fumée et de la flamme, au-dessus des charbons ardents. Un autre exemple est celui de la distillation des essences : « *si la tête de l'alambic est ôtée, la vapeur qui monte prend feu à la flamme d'une chandelle, et se change en flamme ; et la flamme court le long de la vapeur de la chandelle jusqu'à l'alambic* ». Dans cet exemple, la vapeur qui monte de l'alambic, qui est fumée, se change en flamme, puis revient en tant que flamme vers l'alambic, fumée et flamme se muant l'une en l'autre. Il cite encore les fumées qui s'élèvent au-dessus de corps chauffés par fermentation qui, si la chaleur devient suffisante, brillent et deviennent flammes, et les corps qui, brûlant, s'évanouissent dans une fumée ardente, « *laquelle fumée, si la flamme est éteinte, est très épaisse et visible, et quelquefois sent fortement, mais dans la flamme perd son odeur en brûlant* ». C'est la nature de la fumée, dans ce dernier cas, qui conditionne la couleur de la flamme (bleue pour le soufre, verte pour le cuivre, jaune pour le suif). Et l'auteur de noter : « *La fumée passant à travers la flamme ne peut qu'être chauffée au rouge, et la fumée chauffée au rouge ne peut avoir d'autre apparence que celle d'une flamme* ».

Ainsi, pour les savants anglais, c'est la chaleur, que l'on communique aux corps en agitant mécaniquement leurs parties, ou en les exposant au feu, qui est responsable de l'émission de la lumière. Newton conjecture d'ailleurs que « *le soleil & les étoiles ne sont que des corps de terre excessivement échauffés* ». Selon d'autres, comme Boerhaave ou Gravesande, c'est le feu, « *corps particulier aussi ancien que les autres* » qui préexiste dans tous les corps, qui est à l'origine de la lumière émise. Par ailleurs, Newton fait de la flamme, et donc du feu, une matière (en l'occurrence non subtile), en l'assimilant à une fumée, dont un niveau de chaleur suffisamment élevé provoque l'inflammation. Chaleur et feu sont ainsi étroitement liés, tout le monde reconnaissant au feu la propriété de donner de la chaleur, mais quelques-uns seulement considérant que la chaleur produit le feu, tandis que d'autres font préexister la matière du feu dans les corps. Et, de façon évidente, la communauté savante anglaise, très axée sur l'idée de la génération mécanique de la chaleur, se passe des matières subtiles pour expliquer les phénomènes caloriques et ignés.

5.2 Le feu

Que disent les dictionnaires de l'époque à propos du feu ? Le DUF-1690, dans son article FEU, le présente comme « *un élément chaud et sec qui entre dans la composition de tous les corps naturels* », et cette définition n'évolue pas dans l'édition de 1727. L'Encyclopédie pose directement la question : « *Mais le feu est-il une matière particulière ? ou n'est-ce que la matière des corps mise en mouvement ? c'est sur quoi les Philosophes sont partagés* ». L'article reprend de nombreux éléments fournis dans les articles MATIÈRE et CHALEUR. Le feu est, selon les cartésiens, « *le mouvement excité dans les particules des corps par la matière du premier élément dans laquelle ils nagent* », selon Newton, « *un corps échauffé* », selon d'autres encore, comme Boerhaave, « *une matière particulière* ». Peter Van Musschenbroek prête au feu deux caractères qui lui sont propres, à savoir la lumière et la raréfaction. Selon lui, « *partout où il y a de la lumière, même sans chaleur, il y a feu* ». Il pense que c'est à la matière du feu qu'on doit l'accroissement du poids des matières qui se consomment, ainsi que nous l'avons décrit. Il considère que si les écoulements électriques sont du feu, il existe nécessairement différentes sortes de feu. Concernant la pesanteur du feu, nous avons vu que Boerhaave la nie, car il attribue aux matières denses dissoutes dans l'air l'augmentation de poids des substances calcinées, alors que d'autres, tels Lemery et Homberg, considère que cette augmentation de poids est le fait de la matière du feu, qui est donc pesante. Le feu est-il un fluide ? S'il en a certaines propriétés, il n'a pas celle d'exercer une pression en tous sens. L'auteur de l'article

opte en faveur d'une « *matière du feu particulière, & présente dans tous les corps* », comme le suggèrent les expériences sur l'électricité. Ce faisant, il assimile la matière du feu à la matière électrique, position qui est celle de Jean-Antoine Nollet, par exemple. Après avoir passé en revue différents phénomènes physiques du feu, l'importance de l'air pour que le feu se conserve est soulignée : « *l'expérience prouve que le feu s'éteint très promptement dans la machine du vide ; & d'autant plus vite qu'on pompera l'air plus vite, & que le récipient sera plus petit & mieux fermé* ». Il faut aussi que les parties grossières de l'aliment du feu [« *les corps qui servent à augmenter ou à entretenir le feu* »], comme la fumée, soient détournées du feu, « *un corps restant d'autant plus longtemps allumé, qu'il jette moins de fumée, comme cela se voit dans la mèche & les charbons de tourbe* ».

Mais c'est dans les phosphores que la matière du feu est présente en plus grande abondance. L'article PHOSPHORE du DUF-1690 présente le phosphore comme « *une matière qui brûle, ou qui devient lumineuse, sans qu'on ait besoin de l'approcher d'un feu sensible. Il est naturel, ou artificiel* ». « *Les phosphores naturels sont des matières qui sans aide de l'art en certains temps deviennent lumineuses, sans avoir jamais aucune chaleur sensible* », comme notamment les vers luisants, ou le sucre quand on le pile dans un lieu obscur. Les phosphores naturels ne luisent pas toujours, et n'impriment jamais aucune chaleur. C'est donc un exemple de lumière qui se produit sans chaleur. « *Les phosphores artificiels sont des matières qui deviennent lumineuses par artifice, sans avoir besoin pourtant de les allumer par un feu sensible* ». Certains phosphores artificiels brûlent et consomment tout ce qu'ils touchent de combustibles, comme les huiles animales produites par distillation (par exemple à partir de l'urine), d'autres n'ont aucune chaleur, comme la pierre de Bologne qui, préalablement chauffée, émet dans l'obscurité une faible lueur. On peut lire dans l'Encyclopédie :

La cause générale de la lumière des phosphores, est que la matière du feu ou celle de la lumière se trouve en général plus abondante dans ce corps que dans d'autres, en sorte que le simple frottement peut le mettre en action, ou que la simple action des particules de feu ou de lumière répandues dans l'air peut la réveiller. Les phénomènes des phosphores ont beaucoup de rapport aux phénomènes électriques.

Sont décrit cinq ordres de phosphores. Le premier ordre est celui des corps rendus phosphores « *par le fluide électrique qui les pénètre* », tels les vers luisants, certaines mouches, l'aiguillon de la vipère irritée, les yeux de certains animaux vivants, certains poissons vivants et

coquillages, ou encore les poils ou cheveux vivement frottés. Le second ordre est celui des corps devenus phosphores « *par des chocs ou frottements rudes qui mettent en jeu le feu contenu dans leurs intérieurs* », par exemple les cailloux vivement frottés les uns contre les autres, ou certains alliages métalliques qu'on lime rudement, ou encore les bois durs et résineux vivement frottés. Le troisième ordre est celui des « *corps qui exposés à la chaleur du soleil ou d'un feu violent, ont absorbé la lumière lors de leur dilatation, & la retiennent ensuite pour ne la laisser échapper que peu à peu, ou seulement lorsqu'une douce chaleur les rapproche de l'état où ils étaient lorsqu'ils l'admirent* », par exemple la pierre de Bologne, certains topazes, albâtres, gypses, dont l'auteur estime qu'ils « *rendent la lumière comme ils l'ont reçue ; je veux dire colorée, suivant la couleur que l'on a donnée au feu qui les a calcinées* ». Le quatrième ordre est celui des corps rendus phosphores « *par fermentation, dissolution, & tout ce qui en dépend, comme exhalaisons, effervescences, &c.* », au rang desquels on peut citer les foins mouillés, la farine, les exhalaisons phosphoriques des mines, les météores comme les feux follets, les étoiles tombantes, les éclairs, ou encore les aurores boréales. Le cinquième ordre comprend « *les phosphores produits par l'union d'un acide particulier au phlogistique* [c'est-à-dire le feu élémentaire] », comme l'acide nitreux qui, enflammé, forme un phosphore, mais qu'on ne sait conserver par aucun moyen connu.

Ces corps qui peuvent briller, voire s'enflammer, sans aucun apport extérieur sous forme de chaleur, constituent une classe importante de corps lumineux au début du XVIII^{ème} siècle, comme nous le verrons avec le phosphore mercuriel, c'est-à-dire la lueur produite par le mercure frottant contre le verre du baromètre, phénomène en l'occurrence de nature électrique. L'apport de chaleur par frottement, qui caractérise certains phosphores du second ordre, et qui rentre dans la catégorie des actions mécaniques génératrices de chaleur décrites par Boyle, n'est pas reconnu en tant que tel par l'auteur de l'article, pour qui l'origine de l'émission lumineuse est interne au phosphore, tenant à un contenu préexistant en matière ignée.

5.3 La lumière

A propos de la lumière, le DUF-1690 dit :

C'est un corps fort subtil, prompt, & délié qui cause la clarté, qui éclaire, qui donne la couleur à toutes choses, qui ébranle les yeux, & rend les objets visibles. Les Philosophes distinguent entre lumière primitive, ou radicale, & lumière seconde ou dérivée. La lumière primitive ou radicale, est

celle qui est dans le corps lumineux, & qui consiste dans un certain mouvement de ses parties, qui les rend capables de pousser à la ronde la matière subtile, qui remplit les pores des corps transparents. Et la lumière seconde ou dérivée, n'est autre chose que l'inclination à se mouvoir, ou la tendance qu'a cette matière subtile à s'éloigner en ligne droite du centre du corps lumineux

A la conception cartésienne exprimée ci-dessus, empruntée à Jacques Rohault, l'auteur oppose la conception atomiste de Pierre Gassendi, qui est aussi celle de Newton, pour qui la lumière consiste en l'écoulement d'une infinité de corpuscules de lumière « *se répandant avec une vitesse incroyable de toutes parts* ». Descartes et Christiaan Huygens rejettent l'approche corpusculaire de la lumière, car comment une quantité si considérable de corpuscule peut-elle être émise par les corps lumineux sans s'épuiser, et d'autre part comment se fait-il que des corpuscules enflammés n'échauffent pas le nerf optique en même temps qu'ils l'éclairent ?

Mr. Huygens concevait donc une longue suite de globules qui forment comme autant de petits bâtons, dont l'une des extrémités touche le soleil, & l'autre le fond de l'œil. Après quoi il doit s'ensuivre, qu'au même instant que le soleil presse l'extrémité qui lui est contiguë, celle qui appuie sur l'œil est aussi pressée. Ainsi la lumière parvient du corps lumineux jusqu'à nous par quelque mouvement imprimé à la matière subtile qui est entre deux, & ce mouvement s'étend successivement par des surfaces, & des ondes sphériques. Mr. Huygens a supputé que la lumière emploie onze minutes à venir jusqu'à nous : c'est-à-dire à parcourir douze mille diamètres de la terre. Les couleurs ne sont qu'une différente réflexion de la lumière

Le DUF-1727 présente quelques éléments complémentaires, en mentionnant le caractère équivoque de la lumière, qui peut être pris pour « *le sentiment particulier que l'âme reçoit par l'impression que les corps lumineux font sur les yeux* », ou pour désigner « *ce qu'il y a dans ces corps par quoi ils causent dans l'âme ce sentiment particulier* ». La même problématique est exprimée pour la chaleur, nous l'avons vu. Les travaux de Nicolas Malebranche traitant la lumière par analogie avec le son sont mentionnés. Le temps que met la lumière à passer du soleil à la terre, estimé à 11 minutes par Ole Christensen Rømer, grâce au décalage temporel mesuré des instants où Jupiter éclipse certains de ses satellites, est indiqué, et quelques considérations sur la propagation de la lumière et ses couleurs sont énoncées. L'Encyclopédie reprend exactement la définition du DUF, avec l'ambiguïté entre effet purement sensoriel et phénomène physique. La doctrine cartésienne de la matière du premier élément agitée qui presse en tous sens les petits globules du second élément, assimilés à des sphères dures qui se touchent et transmettent instantanément l'action de la lumière jusqu'à nos yeux, est brièvement

décrite pour être critiquée. Les globules doivent être élastiques, et non pas durs, pour au moins deux raisons : tout d'abord la lumière ne se transmet pas instantanément, comme le pensait Descartes, ensuite la lumière se réfléchit, ce qui n'est pas compatible avec des globules parfaitement durs. Malebranche, pour qui les parties en mouvement rapide du corps lumineux excitent des vibrations de pression dans la matière subtile qui se trouve entre lui et notre œil, l'amplitude et la fréquence de ces vibrations conditionnant respectivement l'intensité et la couleur de la lumière transmise, remplace les globules durs par des tourbillons, tout en conservant la conception générale de Descartes et Huygens d'une propagation de la lumière sous la forme d'onde sur un substrat de matière subtile. La théorie de Huygens permet d'expliquer la réfraction et la réflexion, mais ne rend pas compte simplement de la propagation en ligne droite de la lumière qui, comme le son, devrait se propager dans tous les sens suivant l'hypothèse ondulatoire. Newton, lui, explique la propagation en ligne droite par l'hypothèse corpusculaire, « *l'action par laquelle le corps produit en nous la sensation de clarté, consist[ant] [...] non dans un effort au mouvement, mais dans le mouvement réel de ces particules qui s'éloignent de tous côtés du corps lumineux en ligne droite, & avec une vitesse presque incroyable* ». Tout obstacle sur le chemin d'une onde en courbe le train, et si la lumière était une onde, « *l'ombre la ferait continuellement fléchir sur son chemin* ». Autant le son peut suivre un chemin courbe, autant « *on n'a jamais vu la lumière se mouvoir en ligne courbe ; les rayons de lumière sont donc de petits corpuscules qui s'élancent avec beaucoup de vitesse du corps lumineux* ».

Puis l'auteur se pose la question du lien entre chaleur et lumière :

On demande s'il peut y avoir de la lumière sans chaleur, ou de la chaleur sans lumière ; nos sens ne peuvent décider suffisamment cette question, la chaleur étant un mouvement qui est susceptible d'une infinité de degrés, & la lumière une matière qui peut être infiniment rare & faible ; à quoi il faut ajouter qu'il n'y a point de chaleur qui nous soit sensible, sans avoir en même temps plus d'intensité que celle des organes de nos sens.

Il dit donc ne pouvoir répondre à cette question pour la simple raison que chaleur et lumière peuvent présenter des variations très faibles, au-dessous de notre seuil de perception, que nous ne sommes pas capables d'évaluer. Puis il donne la vision de Newton sur les relations matière-chaleur-lumière :

M. Newton observe que les corps & les rayons de lumière agissent continuellement les uns sur les autres ; les corps sur les rayons de lumière, en les lançant, les réfléchissant, & les réfractant ; & les rayons de lumière sur les corps, en les échauffant, & en donnant à leurs parties un mouvement de vibration dans lequel consiste principalement la chaleur : car il remarque encore que tous les corps fixes lorsqu'ils ont été échauffés au-delà d'un certain degré, deviennent lumineux, qualité qu'ils paraissent devoir au mouvement de vibrations de leurs parties ; & enfin, que tous les corps qui abondent en parties terrestres & sulfureuses, donnent de la lumière s'ils sont suffisamment agités de quelque manière que ce soit. Ainsi la mer devient lumineuse dans une tempête ; le vif-argent lorsqu'il est secoué dans le vide ; les chats & les chevaux, lorsqu'on les frotte dans l'obscurité ; le bois, le poisson, & la viande, lorsqu'ils sont pourris.

L'auteur termine son article par l'aveu de son incapacité à choisir entre l'hypothèse ondulatoire et l'hypothèse corpusculaire, qui « *ne sont démontrées ni l'une ni l'autre ; & la plus sage réponse à la question de la matière & de la propagation de la lumière, serait peut-être de dire que nous n'en savons rien* ». Il conclut en exprimant les lois essentielles de l'optique, de la catoptrique et de la dioptrique. « *Avec ces propositions bien simples, la théorie de la lumière devient une science purement géométrique, & on en démontre les propriétés sans savoir ni en quoi elle consiste, ni comment se fait sa propagation ; à peu près comme le professeur Saunderson donnait des leçons d'Optique quoiqu'il fût presque aveugle de naissance* ».

L'article LIGHT du Lexicon établit, dans sa définition de la lumière, la même distinction entre sensation et cause de la sensation, et introduit une troisième chose, en donnant au mot lumière le sens, soit (selon certains) d'une action du milieu s'interposant entre l'objet lumineux et nous, soit (selon d'autres) d'un train de rayons se propageant jusqu'à nos yeux. L'origine de la lumière doit être sans aucun doute attribuée au mouvement. Il ne s'agit pas ici du mouvement d'une matière subtile, comme le premier élément de Descartes, mais du mouvement de la matière ordinaire susceptible de donner lieu à une émission lumineuse. L'auteur se réfère à Hooke, qui juge que le mouvement, pour produire de la lumière, doit satisfaire deux conditions : (i) il doit être extrêmement rapide comme celui de la fermentation et de la putréfaction, qui fait briller les saumures et le bois pourri, (ii) il doit être vibratoire, avec des vibrations de période extrêmement brève, ainsi que celles du diamant frotté qui devient luisant. Ces phénomènes, que l'on appellerait aujourd'hui chimiluminescence et triboluminescence, sont caractéristiques des phosphores, que nous avons précédemment décrits. Il n'est nullement question ici de feu et de chaleur comme sources de lumière, celle-ci se trouvant dans le mouvement, dont bien sûr il peut résulter de la chaleur, suivant la théorie de Boyle que nous avons exposée, et du feu, par

exemple par frottement. L'auteur énonce ensuite des éléments des travaux de Newton sur la lumière (réfraction, couleurs), et note que celui-ci, du fait de la propagation en ligne droite de la lumière, considère que cette propagation ne peut consister seulement dans le principe d'action des cartésiens.

Un aspect essentiel de l'article, en grande partie absent du DUF et de l'Encyclopédie, est le long développement consacré à la démonstration, faite par William Molyneux, que la lumière est un « *corps* », donc une matière, au sens de matière physique, et non subtile, comme la considère la plupart des savants français de l'époque. Molyneux, dans sa Dioptrique, dégage trois propriétés de la lumière qui en montrent le caractère matériel. Tout d'abord le phénomène de réfraction, qui montre que la lumière traversant les corps diaphanes y éprouve une résistance. Qu'est-ce qui, si ce n'est un corps, peut subir une résistance de la part d'un milieu ?

On peut concevoir cette résistance au passage de la lumière à travers différents corps diaphanes comme résultant du fait que le milieu empêche qu'elle diffuse et se distribue dans toutes les parties de ce milieu, et donc que ce milieu peut être dit moins illuminable : car de par sa nature, la lumière tend à se diffuser. Et, à l'inverse, plus la lumière affecte également et uniformément les parties du milieu qu'elle éclaire, plus grand est le nombre de particules du milieu éclairé auxquelles elle communique son énergie, plus le milieu peut être dit illuminable, résistant moins à la progression de la lumière. D'où le fait que, plus les parties touchées du milieu sont solides et petites, moins elles admettent entre elles d'espace pour toute autre matière hétérogène, plus important est l'éclaircissement du milieu. Et il est certain que la résistance doit résulter du contact de deux corps, et que le contact, qu'il soit actif ou passif, est le propre des corps.

Ainsi, l'interaction entre la lumière et le milieu est conçue en termes d'action et de réaction mécaniques entre des corps, la résistance du milieu étant d'autant plus faible qu'il est cohésif et admet moins d'impuretés dans ses pores susceptibles de freiner la lumière en l'empêchant de se diffuser.

La seconde propriété confirmant que la lumière est un corps, et un « *corps mû et projeté vers l'avant* », est que son passage d'un lieu à un autre n'est pas instantané, mais prend un certain temps, son mouvement étant le plus rapide de tous. L'auteur cite l'observation par Røemer des éclipses des satellites de Jupiter, qui lui a permis d'estimer la vitesse de la lumière, et donne l'estimation de Newton du temps qu'il faut à la lumière pour nous parvenir du soleil.

Une troisième preuve avancée par Molyneux est que « *la lumière ne peut, par aucun procédé technique ou artifice, être augmentée ou diminuée* ». On ne peut par exemple agrandir la lumière du soleil ou d'une bougie, pas plus qu'on ne peut agrandir un pouce cube d'or, c'est-à-dire en faire plus qu'un pouce cube.

Car chaque fois que nous voyons la lumière s'accroître, c'est au dépens de quelque autre partie du milieu qui a perdu de la lumière, ou que la lumière, qui naturellement aurait dû se diffuser à d'autres parties, a été amenée vers le lieu plus éclairé. Ainsi, par exemple, dans un verre ardent qui concentre la lumière du soleil à son foyer, ou point de combustion ; nous devons tout d'abord considérer que l'image du soleil est projetée au foyer suivant une base distincte de celle du verre. Et, en second lieu, nous pouvons observer tout autour de la tache brillante de l'image du soleil l'ombre marquée que la pleine largeur du verre ardent y projette : car tous les rayons du soleil, qui seraient tombés sur ce large espace d'ombre, sont maintenant réunis et concentrés dans la tache brillante, y produisant une lumière vigoureuse et une chaleur violente.

Une objection peut être faite, à savoir que la lumière est augmentée par la réflexion, sans priver aucun autre lieu de la lumière qu'il aurait sinon reçue. Il est facile de voir que cette objection ne tient pas. Si l'on imagine une bougie placée dans une chambre face à une petite ouverture qui donne sur l'extérieur, la moitié de la lumière de la flamme éclaire la chambre, tandis que l'autre moitié éclaire l'espace extérieur. Si maintenant on place devant l'ouverture un miroir dont la face réfléchissante est orientée vers l'intérieur, la lumière qui auparavant éclairait l'extérieur de la chambre en éclaire l'intérieur, au détriment de l'espace extérieur qui n'est plus éclairé. Nous voyons ainsi que le miroir soustrait la lumière au milieu qui se trouve derrière lui, et la contradiction soulevée tombe. L'auteur s'en prend ensuite à ceux qui prétendent qu'on pourrait éclairer avec la seule flamme d'une lampe tout le hall d'une chapelle (convenablement garnie de miroirs, faut-il supposer), pourvu que la lampe soit suspendue au centre du hall, ce qui reviendrait à créer de la lumière, ce qui est manifestement contraire à ce qui se passe dans la nature, et aux conclusions du raisonnement précédent. L'intensité de la lumière, et de la chaleur (c'est la seule référence à la chaleur faite dans l'article), est proportionnelle à la densité des rayons lumineux, et celle-ci varie en tous lieux, et à toute distance de la source de lumière, comme l'inverse du carré des distances. La théorie de la lumière de Malebranche est brièvement décrite en fin d'article.

Le contenu de l'article du Lexicon diffère donc sensiblement des contenus des articles du DUF et de l'Encyclopédie, en cela qu'il se centre, exception faite des passages consacrés aux lois de

propagation de la lumière, sur la question du caractère de corps, donc de matière, de la lumière. L'article du Lexicon ne fait quasiment aucune allusion à la chaleur, et aux relations possibles entre chaleur et lumière, sujet préoccupant les savants français, et ne cite comme exemples, à l'appui de l'idée que la lumière naît du mouvement, que ceux de phosphores dont la lumière ne s'accompagne d'aucun feu, ni d'aucune chaleur. La lumière y est présentée comme une matière à part entière, en interaction mécanique avec son environnement.

6. L'éther

Les articles ÉTHER des DUF et de l'Encyclopédie apportent un éclairage complémentaire. L'éther est, selon le DUF-1690, « *cette substance pure qui est au-dessus de l'atmosphère, qui remplit tout le ciel où les astres font leur cours* ». L'édition de 1727 offre d'autres informations sur la rareté de l'éther par rapport à l'air, et sur l'existence de différents éthers de différents degrés de rareté, « *ce qui rend l'Éther un moyen propre à transmettre la lumière & les influences des Astres les plus éloignés* ». L'article de l'Encyclopédie reprend une définition de l'éther assez similaire à celle figurant dans le DUF. L'éther, dont la nécessité de l'existence est invoquée pour éviter que « *la plus grande partie de l'Univers soit entièrement vide* », ou bien n'emplisse que l'espace entre les corps célestes, au-dessus de l'atmosphère, ou bien est « *d'une nature si subtile, qu'il pénètre l'air & les autres corps, & occupe leurs pores & leurs intervalles* ». Certains estiment que l'éther n'existe pas, et que « *l'air lui-même, par son extrême ténuité & par cette expansion immense dont il est capable, peut se répandre jusque dans les intervalles des étoiles & être la seule matière qui s'y trouve* ». Le terme même d'éther est ambigu, certains nommant éther un fluide de même nature que les autres corps, mais s'en distinguant par sa ténuité, alors que la tradition ancienne lui attribue une nature plus pure et plus subtile que celle des « *substances qui sont autour de la terre* ». Il existe ainsi un continuum de représentations de l'éther, qui va de l'air pur à la matière la plus subtile. La matière subtile, telle que définie dans l'Encyclopédie, est à l'origine « *le nom que les Cartésiens donnent à une matière qu'ils supposent traverser & pénétrer librement les pores de tous les corps, & remplir ces pores de façon à ne laisser aucun vide ou interstices entre eux* ». Or, pour que cette matière ne puisse laisser aucun vide, il faut qu'elle-même n'en comporte pas, ce qui implique qu'elle soit « *parfaitement solide, beaucoup plus solide, par exemple que l'or, & par conséquent, qu'elle [soit] beaucoup plus pesante que ce métal, & qu'elle [résiste] davantage* ». Ce qui est jugé « *ne pas s'accorder avec les phénomènes* », comme par exemple les mouvements réguliers des astres, ainsi que l'avance Newton pour s'opposer au système cartésien : « *si les cieux étaient*

remplis exactement d'une matière fluide, quelque subtile qu'elle fût, elles résisterait au mouvement des planètes & des comètes, beaucoup plus que ne ferait le mercure ». Mais Newton convient néanmoins de l'existence d'une matière subtile, « *ou d'un milieu beaucoup plus délié que l'air, qui pénètre les corps les plus denses* ». Suite à l'expérience de thermométrie déjà décrite, il conclut que la chaleur traverse le verre de la machine pneumatique vidée de son air, ce qui implique la présence d'un corps intermédiaire traversant les pores du verre et propageant la chaleur, tout comme la lumière. Ce corps intermédiaire, qu'il appelle milieu éthéré, doit baigner tout l'espace puisque, traversant le verre, il doit traverser tous les autres corps.

Ayant établi l'existence de ce milieu éthéré, Newton passe à ses propriétés, « *& dit qu'il est non-seulement plus rare & plus fluide que l'air, mais encore beaucoup plus élastique & plus actif ; & qu'en vertu de ces propriétés, il peut produire une grande partie des phénomènes de la nature. C'est, par exemple, à la pression de ce milieu que Newton semble attribuer la gravité de tous les autres corps ; & à son élasticité, la force élastique de l'air & des fibres nerveuses, l'émission, la réfraction, la réflexion, & les autres phénomènes de la lumière* ». Ainsi le milieu éthéré de Newton explique-t-il, selon lui, non seulement la propagation de la lumière et de la chaleur dans le vide, mais également la gravité et l'élasticité de l'air, qui lui est conféré par l'éther auquel il est mélangé.

L'article du Lexicon consacré à l'éther commence par reprendre la définition qu'en donne Hooke, à savoir d'un « *corps fluide dans lequel tous les autres corps font comme s'ils y nageaient et se mouvaient* », mais il ajoute que cette conception se rapproche trop de la « *doctrine cartésienne d'un plein absolu qui, par de nombreuses raisons et expériences infaillibles, est prouvée être impossible* ». Et voici comment, tout en nuances, il définit l'éther :

De la même façon que nous appelons air le milieu dans lequel nous respirons et vivons, corps fluide élastique, dont les très grands interstices sont, soit vides de toute matière, soit partiellement remplis d'un fluide aisément expulsé en cas de compression, et réintégré après celle-ci, nous nous accordons à appeler ce corps fluide plus fin, si c'est un corps, s'étendant autour de notre air et notre atmosphère, au-dessus et au-delà de lui, jusqu'aux planètes, ou jusqu'à une distance indéfinie ; ceci, dis-je, nous l'appelons l'éther, bien que ce que nous entendons par ce mot, nous le comprenions mal. Car, qu'il ne puisse y avoir aucun fluide dont les parties résistent au mouvement des corps à travers elles (comme le fait notre air) dans les régions planétaires, cela est certainement démontré ; parce que le mouvement des corps célestes n'est en aucune façon entravé ou altéré par quelque résistance que ce soit, mais qu'ils se meuvent aussi librement que s'ils étaient dans le vide absolu. Mais ce que l'on

entend souvent par le mot Æther ou matière Æthérée, est un très fin fluide diaphane qui encercle la terre jusqu'aussi loin qu'est le monde interstellaire, et qui pénètre aisément et court à travers toutes choses, et laisse toute choses courir aussi bien à travers lui.

Ainsi, la conception de l'éther exprimée dans le Lexicon est assez proche de celle qui figure dans le DUF et l'Encyclopédie, se démarquant du système cartésien, dont même la position de Hooke est jugée trop proche, au profit d'un éther extrêmement léger emplissant tout l'espace, tel que l'introduit Newton, au risque de l'incohérence de sa pensée. L'éther est donc, au début du XVIII^{ème} siècle, une notion floue, autant que foisonnante, dont l'existence est loin d'être unanimement admise.

7. Conclusion

Nous terminerons ce chapitre en revenant au constituant principal de l'atmosphère, l'air, et en analysant ce que l'article AIR de l'Encyclopédie nous dit de ses trois propriétés jugées fondamentales, à savoir sa fluidité, sa pesanteur, son élasticité. L'idée que la chaleur favorise la fluidité des corps par l'agitation des parties, un degré d'agitation très élevé, au-delà du niveau nécessaire pour produire la fluidité, produisant la chaleur, et à l'extrême limite l'embrassement, que l'on trouve par exemple dans l'article HEAT du Lexicon, trouve son exacte traduction dans le passage suivant de l'Encyclopédie :

Quelques Philosophes modernes attribuent la cause de la fluidité de l'air, au feu qui y est entremêlé, sans lequel toute l'atmosphère, selon eux, se durcirait en une masse solide & impénétrable ; & en effet, plus le degré de feu y est considérable, plus elle est fluide, mobile & perméable ; & selon que les différentes positions du soleil augmentent ou diminuent ce degré de feu, l'air en reçoit toujours une température proportionnée.

Concernant la pesanteur de l'air, l'auteur de l'article cite les expériences menées dans les machines pneumatiques, qui prouvent le poids de l'air. Mais d'où lui vient son poids ? « *Quelques personnes douteront peut-être que l'air soit pesant de lui-même, & croiront que sa pesanteur peut venir des vapeurs & des exhalaisons dont il est rempli. Il n'y a aucun lieu de douter que la pesanteur de l'air ne dépende effectivement en partie des vapeurs* ». A l'appui de cette opinion, l'auteur décrit une expérience dans laquelle une boule de verre pleine d'air, fermée à son sommet par une cloison percée de petits trous, est pompée en totalité. Après quoi,

on recouvre la cloison de sel de tartre, et on laisse entrer l'air lentement à travers les sels dans la boule. Et voici ce que dit l'auteur :

Si l'air de l'atmosphère est sec, on trouve que l'air qui avait auparavant rempli la boule, était de même pesanteur que celui qui y est entré en traversant les sels ; & s'il fait un temps humide, on trouvera que l'air qui a passé à travers les sels, est plus léger que celui qui auparavant avait rempli la boule. Mais quoique cette expérience prouve que la pesanteur de l'air dépende en partie des vapeurs qui y nagent, on ne peut s'empêcher de reconnaître que l'air est pesant de lui-même ; car autrement il ne serait pas possible de concevoir comment les nuées qui pèsent beaucoup pourraient y rester suspendues, ne faisant le plus souvent que flotter dans l'air avec lequel elles sont en équilibre.

Puis différentes valeurs du poids de l'air relativement à celui de l'eau, estimées par Giovanni Battista Riccioli, Marin Mersenne, Galilée, ou encore Boyle, sont fournies, toutes de l'ordre de 1 à 1000. Des mesures faites en présence de la Société Royale de Londres donnent une proportion variant entre 1 à 840 et 1 à 885. Mais Musschenbroek donne une gamme de variation beaucoup plus importante :

Musschenbroek dit avoir quelquefois trouvé que la pesanteur de l'air était à celle de l'eau comme 1 à 606, lorsque l'air était fort pesant. Il ajoute qu'en faisant cette expérience en différentes années & dans des saisons différentes, il a observé une différence continuelle dans cette proportion de pesanteur ; de sorte que suivant les expériences faites en divers endroits de l'Europe il croit que le rapport de la pesanteur de l'air à celle de l'eau doit être réduit à certaines bornes, qui sont comme 1 à 606, & de-là jusqu'à 1000.

Une telle variation, très supérieure à la variation naturelle de la pression barométrique, suggère une contribution des vapeurs et exhalaisons au poids de l'atmosphère considérable, de l'ordre d'au moins 30%, cette conception d'une atmosphère lourdement chargée en impuretés ayant, nous le verrons, un fort impact sur l'appréhension par les savants cartésiens du fonctionnement de l'atmosphère au début du XVIII^{ème} siècle.

Concernant l'élasticité de l'air, dont on considère à l'époque qu'elle lui est propre, contrairement à la gravité et à la fluidité, qu'il partage avec les autres fluides, il est noté que la loi des dilatation, dite aujourd'hui de Boyle-Mariotte, n'est pas tout-à-fait exacte quand on réduit l'air à un volume quatre fois plus petit, et que si on le comprimait encore davantage, il doit exister une limite au-delà de laquelle les parties se touchent et ne forment qu'une masse

solide, empêchant toute compression. De la même façon, la règle ne peut être tout-à-fait exacte aux grandes dilatations car « *lorsque l'air est raréfié le plus qu'il est possible, il n'est alors chargé d'aucun poids, & il occupe cependant un certain espace* ». Le ressort de l'air ne s'affaiblit pas avec le temps : « *M. de Roberval ayant laissé un fusil à vent chargé pendant 16 ans d'air condensé, cet air mis enfin en liberté, poussa une balle avec autant de force, qu'aurait pu faire un air tout récemment condensé* ». De combien l'air peut-il être comprimé ?

M. Boyle a trouvé le moyen de rendre l'air treize fois plus dense en le comprimant : d'autres prétendent l'avoir vu réduit à un volume 60 fois plus petit. M. Hales l'a rendu 38 fois plus dense à l'aide d'une presse : mais en faisant geler de l'eau dans une grenade ou boulet de fer, il a réduit l'air en un volume 1838 fois plus petit, de sorte qu'il doit avoir été plus de deux fois plus pesant que l'eau ; ainsi comme l'eau ne peut être comprimée, il s'ensuit de là que les parties aériennes doivent être d'une nature bien différente de celles de l'eau : car autrement on n'aurait pu réduire l'air qu'à un volume 800 fois plus petit ; il aurait alors été précisément aussi dense que l'eau, & il aurait résisté à toutes sortes de pressions avec une force égale à celle que l'on remarque dans l'eau

Ce résultat de Stephen Hales a été contesté par Halley, qui pensait qu'on ne peut comprimer l'air de plus de 800 fois, car il atteint alors la densité de l'eau, et ne peut en aucun cas être comprimé davantage, l'eau étant jugée incompressible. Concernant la dilatabilité de l'air, « *on peut [...] conclure, selon M. Musschenbroek, de quelques expériences assez grossières, que l'air qui est proche de notre globe, peut se dilater jusqu'à occuper un espace 4000 fois plus grand que celui qu'il occupait* ». En opérant des dilatations successives d'un volume d'air, Boyle conclut « *que l'air que nous respirons près de la surface de la terre est condensé par la compression de la colonne supérieure en un espace au moins 13679 fois plus petit que celui qu'il occuperait dans le vide* ». Il semble supposer qu'on peut réduire par compression un volume de gaz au 40^{ème} de sa valeur, lorsqu'il avance que « *si ce même air est condensé par art, l'espace qu'il occupera lorsqu'il le sera autant qu'il peut l'être, sera à celui qu'il occupait dans ce premier état de condensation, comme 550000 est à 1* ». Enfin, le degré dilatation de l'air influe sur sa capacité à pénétrer les corps, par exemple le bois : d'après Musschenbroek, « *lorsque l'air est dilaté jusqu'à un certain point, il ne passe plus alors à travers les pores de toutes sortes de bois* ».

Avant de clore ce chapitre, revenons pour terminer sur l'autre constituant essentiel de l'atmosphère, à savoir la matière éthérée, dont nous avons vu que l'existence est postulée, notamment, sur la base du fait que lumière et chaleur se propagent dans le vide de la machine

pneumatique. Cette matière éthérée se scinde en un grand nombre de matières subtiles, invoquées pour expliquer différents phénomènes. Il y a par exemple la matière magnétique, responsable de l'orientation de l'aiguille aimantée et de l'attraction entre l'aimant et le fer, qui opère dans le vide, comme l'ont montré les expériences réalisées par Boyle ; ou encore la matière électrique, responsable de lueurs et d'effets d'attraction et de répulsion entre corps électrisés, qui se transmet à travers le vide, ainsi qu'en attestent les étincelles obtenues par Francis Hauksbee dans son générateur d'électricité statique. Certaines de ces matières sont supposées pouvoir être identiques, par exemple celles qui transmettent la lumière et la chaleur, selon Newton. Nollet assimile la matière électrique à la matière du feu. Laurent Bérault tente d'unifier matière magnétique et matière électrique. De nombreuses théories sont élaborées pour parvenir à une vision plus intégrée de l'éther et des matières subtiles. La plupart des matières citées ci-dessus, ainsi que quelques autres, comme la matière réfractive de Cassini, la matière solaire de Descartes, ou l'air subtil invoqué par Jean Bernoulli pour expliquer le phosphore mercuriel, interviennent dans les représentations de l'atmosphère qui sont développées à la fin du XVII^{ème} siècle et au XVIII^{ème} siècle pour expliquer les phénomènes naturels servant à estimer sa hauteur : la réfraction de la lumière des étoiles (matière réfractive), la réflexion de la lumière du soleil (effet de l'atmosphère solaire, donc de la matière solaire, sur la hauteur de l'atmosphère estimée par la méthode des crépuscules), les bolides traversant l'atmosphère et les étoiles filantes (matière électrique), aurores boréales (matière solaire, air subtil, matière magnétique), etc... L'objet des chapitres qui suivent est précisément d'examiner ces matières subtiles, et la façon dont elles sont supposées interagir avec l'atmosphère pour expliquer les différents phénomènes qui jalonnent la quête de son sommet.

Chapitre 2. Matière réfractive

1. Introduction

L'introduction de la matière réfractive au début du XVIII^{ème} siècle touche les fondements même de la représentation de l'atmosphère héritée du siècle précédent. Johannes Kepler, au début du XVII^{ème} siècle, a estimé la hauteur de l'atmosphère, sur la base d'un modèle simple de réfraction atmosphérique, supposant une couche homogène d'air à l'entrée de laquelle la lumière de l'étoile est réfractée à l'interface entre l'air et l'éther, à 3,6 km, une valeur donc très faible, voisine de la hauteur des nuages. Durant tout le XVII^{ème} siècle a perduré l'idée que l'agrandissement de la lune à l'horizon est le fait de la réfraction, attribuée aux vapeurs et exhalaisons présentes dans région basse de l'atmosphère, en dépit de la preuve faite par les astronomes, dont d'ailleurs Kepler, que le diamètre angulaire mesuré de la lune n'est pas plus grand sur l'horizon qu'au méridien. La faible hauteur de l'atmosphère « réfractive », estimée par Kepler, et un demi-siècle plus tard par Jean-Dominique Cassini, et l'idée d'un rôle majeur des impuretés, concentrées dans les premiers kilomètres au-dessus du sol, dans le phénomène de la lune agrandie, s'accordent parfaitement pour suggérer que la réfraction est le fait des vapeurs et exhalaisons relâchées par la terre. Nicolas Hartsoeker, partageant l'opinion de Descartes suivant laquelle les rayons de lumière passent plus librement à travers un milieu dur et structuré qu'à travers une substance molle et désorganisée, propose un modèle de réfraction dans lequel n'interviennent que les particules solides en suspension dans l'atmosphère, la réfraction n'étant donc le fait que de la présence de la composante particulaire de l'atmosphère. Or, précisément, ce que découvrent Jacques Cassini, et quelques autres, c'est que la présence de particules, comme lorsqu'une étoile est vue à travers un nuage fin, ne génère aucune réfraction. Cette incohérence, et quelques autres, vont conduire les savants cartésiens à postuler l'existence d'une matière réfractive subtile, traversant les pores du verre et ne pesant donc pas sur le mercure du baromètre, responsable de la réfraction atmosphérique. Cette matière présente aussi l'avantage de pouvoir être supposée concentrée dans les premiers kilomètres au-dessus du sol, la méthode basée sur la durée des crépuscules indiquant une hauteur de l'atmosphère de l'ordre de 70 km, jugée par certains incompatible avec la faible hauteur suggérée par les modèles de réfraction atmosphérique.

Dans la partie 2, nous détaillons les conceptions de l'atmosphère régnant avant la découverte du caractère pesant de l'air, et de son élasticité, au milieu du XVII^{ème} siècle, puis les évolutions liées au passage de l'atmosphère du statut d'objet mathématique idéalisé, siège de la réflexion et de la réfraction de la lumière des astres, à celui de l'objet physique complexe qui va donner naissance au début du XVIII^{ème} siècle à l'idée de matière réfractive. Nous présentons dans la partie 3 les cinq arguments principaux ayant conduit à l'introduction de la matière réfractive, puis discutons dans la partie 4 quelques aspects particuliers du problème, du point de l'observation, de celui de la doctrine cartésienne, enfin de l'intérêt pour les mathématiciens adeptes du calcul infinitésimal du concept de matière réfractive. Nous replaçons dans la conclusion la question dans le contexte général de l'évolution des idées en matière de physique atmosphérique.

2. État des connaissances au XVII^{ème} siècle

2.1 Représentations de l'atmosphère au milieu du XVII^{ème} siècle

Au début du XVII^{ème} siècle, la conception dominante, héritée de la scholastique du Moyen-Âge, est celle d'une zone terrestre et sublunaire composée de quatre éléments (Henrion, 1620) : la terre, l'eau, l'air et le feu, dans la tradition aristotélicienne. L'air se répartit autour de la Terre en trois régions : (i) la région basse, celle où nous vivons et respirons, qui par nature est chaude, sa chaleur étant renforcée par l'effet des rayons du soleil réfléchis par la surface qui échauffent l'air, et qui est donc plus épaisse à l'équateur où la chaleur est plus intense ; (ii) la région haute, qui s'étend du sommet des plus hautes montagnes jusqu'à la frontière de l'élément feu, emplissant l'espace sublunaire au-dessus de l'air, au contact duquel cette région est échauffée ; (iii) la région intermédiaire, comprise entre les deux autres, qui absorbe le froid repoussé par la chaleur des régions contigües ; le froid s'y serre et y « *amasse toutes les forces pour sa défense et sa conservation* » ; cette région, où s'engendrent les tonnerres, les foudres, la pluie, la grêle et la neige, est plus épaisse aux pôles, et plus mince à l'équateur. Des échanges permanents de vapeurs et d'exhalaisons ont lieu entre les deux régions inférieures. Ces vapeurs et exhalaisons migrent vers les régions conformes à leur nature : les exhalaisons sèches ont pouvoir de s'enflammer et s'élèvent jusqu'à la région haute placée au contact de l'élément feu, tandis que les vapeurs humides plus lourdes, et qui peuvent se transformer en eau, demeurent dans les régions inférieures.

Cette conception n'est pas partagée par tous. Les stoïciens ne reconnaissent pas l'éther d'Aristote comme cinquième élément, et privilégient l'air et le feu parmi les quatre éléments fondamentaux. La doctrine stoïcienne suivant laquelle la substance de l'éther ne diffère pas en nature de la matière terrestre est reprise par Jean Pena au milieu du XVI^{ème} siècle (Barker, 1985). Cette substance, nommée Pneuma, ne diffère de l'air terrestre qu'en degré de pureté. La cosmologie stoïcienne propose une physique unifiée de la terre et du ciel, à laquelle notamment adhère Kepler au tournant du XVII^{ème} siècle. Pena, pour légitimer cette conception, s'appuie sur l'observation de Gemma Frisius suivant laquelle, selon lui, la réfraction de la lumière ne perturbe pas la position apparente des étoiles dans le ciel nocturne. Le raisonnement de Pena est le suivant. Si Aristote avait raison, la lumière des étoiles devrait, pour nous parvenir, traverser successivement trois milieux : l'éther, le feu, puis l'air. La distance apparente entre deux étoiles apparaîtrait alors plus grande au voisinage de l'horizon qu'au zénith, comme un bâton immergé dans l'eau paraît plus long. Or, sur la base des observations de Frisius, cela n'est pas le cas. Ainsi, conclut Pena, « *l'art de l'optique nous enseigne que ce qui est entre nous et la sphère des étoiles fixes, c'est de l'air* ». L'air de Pena est un « esprit aérien ». Avec lui, la conception stoïcienne entre dans le débat scientifique. Kepler, qui parle abondamment de Pena dans la préface à sa Dioptrique publiée en 1611, et bien qu'il rejette son argument basé sur la réfraction, accepte l'idée que la substance des cieux soit l'air, ainsi qu'il l'écrit dans son *Mysterium Cosmographicum* (1596, réédité en 1621). Mais il s'agit d'un air spirituel, consubstantiel au corps, source de vie et de mouvement des astres, car Kepler est un homme religieux :

[...] par quels barreaux, quelles chaînes, quel impératif céleste, cette Terre, dont Copernic a montré qu'elle est en mouvement, a-t-elle été portée dans sa sphère? Avec cet air, sans aucun doute, que (fermenté et mélangé avec des vapeurs) nous buvons tous autour de la surface de la Terre, que nous pénétrons de nos mains, de notre corps, mais que nous ne divisons pas, quoiqu'il transmette les influences célestes jusque dans nos corps. Car c'est le ciel dans lequel nous et tous les corps du monde vivons, bougeons et portons notre être.

Kepler, dans la suite de sa vie, introduira néanmoins une frontière de densité entre l'éther (ou un air très pur), et l'air ambiant de l'atmosphère, comme l'avait fait Tycho Brahé dans ses échanges avec Christoph Rothmann à la fin du siècle précédent, lorsqu'il calculera en 1621 la hauteur de cette atmosphère à partir d'un modèle de réfraction quantitatif, le premier jamais

réalisé. Le terme d'atmosphère, qui n'est d'ailleurs pas utilisé par Kepler, apparaît au tout début du XVII^{ème} siècle sous la plume de Willebrord Snell van Royen, ou Snellius, qui traduit en latin les versions en néerlandais des œuvres antiques et médiévales réalisées par Simon Stevin, un mathématicien et ingénieur de Bruges soucieux de diffuser au plus grand nombre les témoignages de la sagesse des anciens, et utilise le mot *Atmosfera*, ou « Globe des vapeurs » (Martin, 2015). Stevin s'intéresse particulièrement à la détermination de la hauteur des vapeurs par les savants arabes à partir de la durée du crépuscule, et le mot atmosphère désigne précisément pour lui la région dont cette méthode des crépuscules fournit la hauteur. La méthode consiste à calculer l'altitude des couches ultimes de vapeurs renvoyant la lumière du soleil, au moment où la nuit devient noire. On considère à l'époque que l'air, étant invisible, est complètement transparent et ne peut réfléchir la lumière, contrairement à la matière grossière des vapeurs et des nuages. Le premier à fournir une estimation quantitative de la hauteur des vapeurs est Ibn Mu'adh au XI^{ème} siècle, celui-ci fixant l'angle de dépression solaire au-delà duquel la nuit est complète à 18°, ou 19° (Goldstein, 1976). A partir d'un calcul trigonométrique simple, Ibn Mu'adh estime à 85 km la hauteur de l'atmosphère, valeur arrondie à 80 km dans la traduction en hébreu de ses textes. Le portugais Pedro Nunes est le premier savant européen à estimer la durée du crépuscule au XVI^{ème} siècle, en utilisant un angle de 16°, qui sera repris par Tycho Brahé. On trouve dans *Almagestum Novum* de Giovanni Battista Riccioli (1651) un tableau présentant 17 valeurs de la hauteur de l'atmosphère calculées par ses prédécesseurs, ainsi que 4 valeurs proposées par lui, aux équinoxes et aux solstices, ce qui montre à quel point cette méthode et ses résultats sont admis par la majorité. Martin (2015) mentionne cependant les réticences d'aristotéliens, comme par exemple le jésuite Niccolo Cabeo, qui au milieu du XVII^{ème} siècle estime que la hauteur de 80 km n'est pas compatible avec le fait que le sommet des nuages est fréquemment au-dessous des pics montagneux, et qui doute plus généralement de la capacité des mathématiques à représenter le fonctionnement de la nature. Le franciscain Bartolomeo Mastri soutient à la même époque, que si la hauteur estimée par les crépuscules est exacte pour l'air chargé d'exhalaisons le plus grossier, l'air plus léger et plus sec qui s'étend au-dessus jusqu'à la lune est le lieu des météores ardents. On le verra, Kepler s'oppose aussi, par son calcul de la hauteur de l'atmosphère à partir de la réfraction de la lumière des étoiles, à la valeur canonique estimée par Ibn Mu'adh.

L'agrandissement perçu de la lune et du soleil quand ils sont proches de l'horizon, suivant le phénomène appelé dit aujourd'hui de « l'illusion lunaire » (Plug et Ross, 1989), car de nature purement psychologique, joue un rôle important dans l'histoire de la représentation de

l'atmosphère, en cela, nous l'avons déjà souligné, qu'il a été longtemps attribué à la réfraction atmosphérique, phénomène dont l'étude mathématique fut au XVII^{ème} siècle un moteur puissant de la construction de l'objet atmosphère (cf chap. 7). Les premières mentions écrites de ce phénomène remontent au VII^{ème} siècle av. J.-C.. Aristote attribue dans ses *Météorologiques* l'effet d'agrandissement à la réfraction de la lumière par les particules des nuages, plutôt que par les vapeurs qui en sont à l'origine, idée que l'on retrouve chez les physiciens cartésiens, tel Hartsoeker, au début du XVIII^{ème} siècle. Ptolémée défend dans son *Almageste* une position similaire, invoquant un effet de la réfraction semblable à celui qui fait paraître un objet vu dans l'eau plus gros, et cela d'autant plus qu'il y est profondément immergé. Le phénomène de réfraction était à l'époque déjà connu, une partie de ses lois ayant été exposées par Archimède. Cléomède (I^{er} siècle) avait correctement interprété l'éclipse de lune paradoxale relatée par Pline l'Ancien, au cours de laquelle par un effet de la réfraction, la lune et le soleil sont tous les deux visibles simultanément au-dessus de l'horizon, comme un effet de la réfraction atmosphérique (Lehn, 2005). Ptolémée, puis Alhazen, aperçoivent la nature psychologique du phénomène, le second, tout en reprenant l'explication opto-géométrique par la réfraction comme une cause « accidentelle » de l'illusion lunaire, au sens aristotélicien, élaborant une théorie psychologique détaillée et multiforme qui sera reprise par Roger Bacon dans son *Opus Major* au XIII^{ème} siècle (cf chap. 7). Mais cette question fait pourtant l'objet d'intenses controverses durant tout le XVII^{ème} siècle, en dépit des observations d'astronomes montrant, non seulement l'absence de tout agrandissement physique des astres sur l'horizon, mais au contraire un léger rétrécissement dû à l'augmentation d'un rayon terrestre de leur distance à l'observateur. On trouve à l'entrée *ATHMOSPHERE* du *Dictionnaire Universel* (1690), nous l'avons dit, mention de l'agrandissement de la lune à son lever, attribuée à une atmosphère définie comme la partie basse, chargée de vapeurs, de l'air : « *La lune paraît plus grosse à son lever, à cause des vapeurs de l'Atmosphère* ».

De nombreux savants de la première moitié du XVII^{ème} siècle considèrent que l'air s'étend très loin de la terre. En 1620, Biancani distingue l'air pur, libre de toute exhalaison ou vapeur, diaphane et transparent, de l'air impur, qui a été appelé *Athmosphère*. Cet air atmosphérique impur se tient plus près de la Terre et, parce qu'il est imprégné des exhalaisons terrestres, réfléchit les rayons du soleil. Personne ne sait très bien la nature de la matière qui surmonte l'atmosphère : air pur, éther, feu, vide ... L'abbé Marin Mersenne exprime ses doutes sur la capacité de l'approche mathématique de la réfraction à permettre de comprendre ce qui se passe au-dessus de l'atmosphère. Il écrit dans *De L'harmonie Universelle* (1637) :

Mais il est plus vraisemblable que l'air est continu depuis la terre jusques au firmament, & peut-être par-delà jusques à l'infini, ou jusques où il a plu à Dieu de l'étendre, & que celui que nous respirons n'est différent de l'autre qu'en ce qu'il est mêlé de plusieurs corps hétérogènes, que l'on appelle vapeurs & exhalaisons, lesquelles sont peut-être autour de la Lune, du Soleil & des Etoiles, comme autour de notre terre, laquelle nous mettrions entre les Planètes, si nous étions dans le Soleil, ou dans Mars.

On peut lire dans les anecdotes de la vie de Jean-Dominique Cassini, à propos de l'apparition de la comète de 1652, le passage suivant qui montre que cette vision d'une atmosphère s'étendant partout entre les planètes est partagée par les astronomes de l'époque :

Dans le traité que je composai en cette occasion sur cette comète, je ne m'éloignais guère de l'hypothèse la plus commune sur la génération des comètes, avec cette différence que j'attribuais leur origine au concours des exhalaisons tant de la terre que des astres; car je supposais que chaque astre a une atmosphère qui s'étend fort loin, et qui se mêle avec les atmosphères des autres astres.

Samuel de Sorbière, atomiste ami de Pierre Gassendi, aborde plusieurs fois cette question dans une correspondance des années 1650. On peut y lire notamment « *A quoi je vous réponds pour eux [les physiciens], qu'ils font que l'étendue de l'univers n'est autre chose que la rencontre des Atmosphères* ».

Dans la première moitié du XVII^{ème} siècle, l'air demeure un fluide mystérieux. Certains ont déjà émis, avant la fameuse expérience de Torricelli, l'idée qu'il est pesant (Rougier, 1927). En 1570, Jérôme Cardan, se basant sur des expériences de résistance au mouvement dans l'air et dans l'eau, évalue le rapport entre les densités de l'eau et de l'air à 50. En 1629, Isaac Beeckmann, un physicien et mathématicien néerlandais affirme, dans ses entretiens avec Gassendi, que l'air est « *grave* », et que cette gravité est la cause de la « *fuite du vide* ». En 1630, Giovanni Battista Baliani affiche sa conviction que le vide est possible, et que l'air a un poids « *sensible* ». Pour lui, la nature ne répugne pas au vide, c'est plutôt qu'il faut produire une grande violence pour obtenir le vide par le moyen d'une force proportionnée au poids de la colonne d'air. Il estime que « *plus l'air se trouve élevé au-dessus du sol, plus il est léger* ». La même année, Jean Rey, par des expériences de calcination de l'étain et du plomb, trouve que le poids de ces métaux augmente lors du processus, la chaux blanche dérivée de l'étain, par

exemple, étant plus lourde que l'étain. Il insiste sur l'accroissement avec la hauteur de subtilité et de légèreté de l'air :

En toutes choses fluides, tant composées que simples ou élémentaires, les parties hautes diffèrent toujours des basses en subtilité et pesanteur : et que cette différence se distingue en autant de degrés que leur matière peut se diviser par leur hauteur en autant de parties distinctes. [...] Car d'attribuer à toutes les parties de chaque élément une même corpulence, c'est démentir le sens, qui nous fait juger l'air (par exemple) plus subtil au sommet d'une montagne, que non pas au pied, dans la plaine.

Marin Mersenne, le premier à avoir fait connaître les expériences de Torricelli en France, réalise dans les années 1640 diverses expériences pour mesurer le poids spécifique de l'eau comparé à celui de l'air. Galilée et Descartes s'y essaient également. Les mesures faites au milieu du XVII^{ème} siècle présentent des incertitudes très grandes, avec des valeurs qui s'étalent entre 145 et 1870 (encadrant la valeur effective qui est ≈ 800). En 1643, Evangelista Torricelli, un élève de Galilée, tente de résoudre le problème des fontainiers de Florence qui ne parviennent pas, avec une pompe aspirante, à hisser l'eau de l'Arno à plus de 10 mètres de hauteur. Cette limite est incompatible avec le principe de « l'horreur du vide » posé par Aristote. Il réalise l'année suivante sa fameuse expérience, en remplaçant l'eau par du mercure, et interprète la suspension du mercure comme étant due au poids de l'air. Estimant ce que devrait être le poids de l'air d'après les mesures de hauteur de l'atmosphère basées sur la durée des crépuscules, il estime que le poids trouvé à partir de son expérience est trop faible et en conclut logiquement que l'air « pur » du haut est plus léger, le poids de l'air décroissant nécessairement avec l'altitude :

Nous vivons submergés au fond d'un océan d'air, et nous savons par des expériences indubitables que l'air est pesant et même que cet air épais qui est près de la surface de la terre pèse environ le quatre centième du poids de l'eau [valeur donnée par Galilée, sous-estimée d'un facteur 2]. D'autre part, les auteurs qui ont parlé du crépuscule ont observé que l'air visible et chargé de vapeurs s'élève au-dessus de nous à près de cinquante ou cinquante-quatre milles, ce que je crois exagéré parce que je pourrais montrer que le vide devrait faire beaucoup plus de résistance qu'il ne fait ; mais ils ont une échappatoire, ils peuvent dire que le poids dont parle Galilée doit s'entendre de la région la plus basse de l'air où vivent les hommes et les animaux, mais que, sur la cime des hautes montagnes, l'air commence à être très pur et pèse beaucoup moins que les quatre centièmes de l'eau.

Avant de poursuivre avec la découverte de l'élasticité de l'air et ses conséquences sur la représentation de l'atmosphère, voyons ce que l'approche mathématique de la réfraction

atmosphérique, malgré les doutes et les objections, a apporté à la connaissance de l'atmosphère, objet de nature encore essentiellement mathématique, dans la première moitié du XVII^{ème} siècle.

2.2 L'atmosphère des mathématiciens et la réfraction dans la première moitié du XVII^{ème} siècle

On a vu que l'atmosphère, regroupant les régions basse et intermédiaire de la météorologie aristotélicienne, et qui est donc à la limite compatible avec la doctrine d'Aristote, est dans l'esprit de ses concepteurs l'objet physique dont la mathématisation par la méthode des crépuscules fournit la hauteur. Le mot atmosphère se répand rapidement, après son invention par Snellius, dans la communauté des savants, en particulier des jésuites, qui ont une solide tradition de pratique des mathématiques (Martin, 2015). La capacité de l'atmosphère à réfracter la lumière des astres constitue la propriété la plus mobilisatrice et digne d'étude pour cette communauté. Christoph Scheiner, astronome et mathématicien allemand, remet en question au tout début du XVII^{ème} siècle la vision tripartite d'Aristote, et divise la région sublunaire en seulement deux régions : (i) une région basse qui contient les exhalaisons et les vapeurs terrestres, responsable de la lumière des crépuscules et des halos, (ii) une région haute flottant au-dessus des vapeurs constituée d'un air plus pur que celui que nous respirons, et qui peut être l'éther, ou l'élément feu. Scheiner affirme notamment le rôle des particules terrestres, sèches et se prêtant à être échauffées par le soleil, dans l'opacification de l'atmosphère et la réflexion de la lumière solaire lors des crépuscules, dans une vision corpusculaire de l'atmosphère qui préfigure la conception atomiste d'un Gassendi. La mesure précise par Tycho Brahé de la réfraction des étoiles à la fin du siècle précédent milite pour l'existence d'une frontière réfractive, conforme au système des deux régions, à savoir l'atmosphère et l'éther. Le modèle des deux régions offre ainsi le cadre naturel au développement d'une approche mathématique de la réfraction.

Dès le début du XVII^{ème} siècle, Kepler, puis Scheiner et d'autres, contredisent l'idée que tous les objets célestes sont perçus comme circulaires, en affirmant la forme aplatie du soleil à son coucher ou à son lever, qui résulte nécessairement de la réfraction atmosphérique. Le rôle de la réfraction dans l'illusion lunaire est par ailleurs perçu comme étant sans objet par Kepler, l'existence physique du phénomène étant invalidée par l'observation. Kepler rejette l'idée de vapeurs distantes qui se trouveraient, de façon inexplicable, toujours au loin, mais jamais au-

dessus de l'observateur. Kepler s'intéresse de près à la réfraction de la lumière des étoiles et du soleil, tabulée par son maître Tycho Brahé. Il reprend le modèle de Ptolémée, qui postule une sphère de vapeur de densité uniforme concentrique à la terre, surmontée par l'éther, le rayon lumineux étant rompu à l'interface puis poursuivant en ligne droite jusqu'à l'observateur. Dans son *Optique*, Ptolémée décrit la réfraction dans différents milieux transparents (air, eau, verre) avec des résultats d'observation précis, conformes aux indices de réfraction aujourd'hui bien connus de ces milieux, bien qu'il ne réussisse pas à établir la loi des sinus (dite loi de Snell). Dans sa représentation de la réfraction de la lumière d'un astre à la frontière entre l'air et l'éther, il reconnaît à l'air seul, sans les vapeurs, la capacité de réfracter la lumière. Vitellion, au XIII^{ème} siècle, introduit dans le modèle de Ptolémée une couche de vapeur au sein de la couche d'air pur, avec donc trois réfractions successives de la lumière des étoiles, aux frontières éther - air pur, air pur - air humide, et air humide - air pur (Lehn, 2005). Son modèle traduit l'importance qu'il accorde au rôle des vapeurs comme cause majeure de l'illusion lunaire. Kepler reconnaît dans ces écrits l'importance de la pensée de Vitellion, mais pas sur la question de l'illusion lunaire. Reprenant le modèle initial de Ptolémée, Kepler fournit dans *l'Epitome Astronomiae Copernicae* (1621) une hauteur de l'atmosphère de 3,6 km.

Pour Kepler, les méthodes d'estimation de la hauteur de l'atmosphère, au sens de sphère des vapeurs, par la durée des crépuscules et par la réfraction devraient donner des résultats similaires, puisqu'elles portent sur le même objet « Atmosphère », défini à l'origine comme la région dont la hauteur est fournie par la durée des crépuscules, et milieu où s'opère la réfraction de la lumière des astres à la frontière avec la matière de l'espace sublunaire, éther, feu, ou air pur dans la représentation en deux régions. Kepler résout cette contradiction en invoquant trois explications possibles, que Philippe de La Hire décrit et commente près d'un siècle plus tard (1713) : (i) l'occurrence de plusieurs réflexions successives, au lieu d'une seule, au sein de l'atmosphère ; (ii) la réfraction atmosphérique, (iii) la présence d'une atmosphère solaire lumineuse. La première explication vient à Kepler de son interprétation d'une observation directe du soleil par Barents en 1596, tandis qu'il était en quête d'une voie maritime du nord-est vers la Chine, alors que la vraie position du soleil était 5° au-dessous de l'horizon (Lehn, 2005). Kepler interpréta cette observation en faisant une analogie entre l'atmosphère et un miroir, réfléchissant la lumière aussi à partir de sa face arrière, un rayon frappant à l'oblique le miroir subissant une série de réfractions-réflexions dans l'épaisseur du miroir, suivant un principe qui rappelle le piégeage de la lumière dans une couche d'inversion thermique, à l'origine des mirages. Il constata que la hauteur déduite de la durée des crépuscules serait

moindre si on permettait à la lumière de subir plusieurs réflexions dans l'atmosphère, mais l'argument resta qualitatif, comme le lui reproche La Hire dans son essai. Concernant la deuxième explication, La Hire calcule la correction à apporter qui, cumulée avec la prise en compte de l'extension angulaire du soleil, se traduit par une réduction de l'angle limite de 18° à 17° , et abaisse de 80 km à 70 km la hauteur estimée de l'atmosphère. Sur la troisième explication, La Hire montre que ce que Kepler prend pour un halo circulaire entourant le soleil n'est autre que la zone éclairée délimitée par la projection du cône d'ombre de la Terre sur les dernières couches réfléchissantes de l'atmosphère. L'arc crépusculaire est une hyperbole, que la réfraction au voisinage de l'horizon déforme en le rapprochant de la forme circulaire, d'où, selon La Hire, l'interprétation erronée de Kepler.

2.3 Pesanteur et élasticité de la matière atmosphérique dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle

Marin Mersenne, Blaise Pascal, Gilles Personne de Roberval, Adrien Auzout, René Descartes sont les acteurs de cette période de quelques années, au cours de la décennie 1640, durant laquelle la découverte de Torricelli est interprétée et affinée. C'est probablement sur la suggestion de Descartes, qui a rencontré Pascal à Paris en 1647, qu'est réalisée par Florin Périer en 1648 la fameuse expérience du Puy-de-Dôme qui démontre que le poids de l'atmosphère diminue avec l'altitude. D'autres expériences du même type ont lieu sur de plus petits dénivelés, comme à la tour Saint-Jacques à Paris. Le débat est vif autour de l'existence du vide entre « *vacuistes* » et « *plénistes* », et de celle d'un poids spécifique de l'air entre tenants de la force attractive du vide et partisans de la colonne d'air. Descartes est pléniste mais favorable à la colonne d'air, Roberval est d'abord vacuiste et partisan de la force attractive du vide, puis se rallie au plein et à la colonne d'air, Pascal ne se soucie d'abord que du vide et ne pose que tardivement la question de la pesanteur et de la pression de l'air. Mersenne quant à lui change plusieurs fois d'opinion. C'est en remettant en question l'existence du vide dans le tube à partir d'expériences montrant qu'il subsiste toujours un peu d'air résiduel au-dessus du mercure, que Roberval fait une découverte majeure, à savoir celle de la raréfaction de l'air, qui ne sera quantifiée qu'une quinzaine d'années plus tard par Boyle et Hooke en Angleterre, et Mariotte en France. Faisant remonter des bulles d'air au-dessus du mercure, il constate qu'en inclinant le tube, le volume d'air que le mercure vient entourer se comprime. Pascal compare l'air à une pelote de laine, dilatable et compressible. Il réalise une expérience qui consiste à transporter

une vessie de carpe remplie d'un peu d'air au sommet d'une montagne, et constater qu'elle se gonfle, pour se dégonfler de façon inverse à la descente.

Beaucoup de ceux qui ont utilisé et popularisé le mot Atmosphère durant la première moitié du XVII^{ème} siècle, comme Snellius ou Scheiner, étaient déjà critiques envers la théorie d'Aristote, mais ceux qui vont leur succéder à partir du milieu du XVII^{ème} siècle sont parmi les anti-aristotéliens les plus déterminés, à savoir les atomistes, dont le principal représentant à cette époque est Gassendi, un épicurien convaincu. Gassendi croit à l'existence du vide. Se servant des estimations de poids spécifique de l'air faites par Mersenne, il fonde en une vision unique les expériences de Torricelli et la doctrine épicurienne selon laquelle tous les atomes, y compris ceux qui composent l'atmosphère, ont un poids. Pour Gassendi, l'atmosphère est composée de corpuscules de consistance laineuse entourant la surface de la terre, et dont la plupart sont des exhalaisons de nature terrestre, pour quelques-unes aquatiques, qui ont un poids et tendent à retomber vers la terre, créant la montée du mercure dans le tube. La vision de Gassendi est proche de celle de Scheiner, qui donne également un rôle important aux exhalaisons terrestres. Gassendi conclut en 1649 à l'existence de deux régions : (i) une région basse chaude, réceptacle des exhalaisons terrestres, (ii) une région haute plus froide, à laquelle il donne le nom d'atmosphère, peuplée de corpuscules, et où se forme neige et grêle, modifiant quelque peu la définition jusqu'alors en cours de l'atmosphère.

Le terme Atmosphère est popularisé outre-Manche par Gassendi à travers les traductions que fait Walter Charleton de son œuvre (Martin, 2015). Dans une traduction perdue de Gassendi, Charleton écrit que les particules pesantes de l'atmosphère « *descendent des régions supérieures de l'atmosphère, et dans leur descente se pressent et se forcent mutuellement, jusqu'à ce qu'elles touchent la surface de la terre, et rebondissent en raison de leur solidité et de leur dureté jusqu'à une certaine hauteur* » (1654). Pour lui, l'atmosphère est remplie de particules d'air, définies comme « *un mélange de corps minuscules, exhalés par la terre et l'eau* » qui rebondissent les uns sur les autres et sur la surface de la terre, dans une vision qui préfigure la théorie cinétique des gaz, reprise et affinée par Daniel Bernoulli un siècle plus tard. L'atomisme de Gassendi le conduit à clairement distinguer la pression de l'air de son poids, la pression chez Gassendi, plus que chez Pascal, étant envisagée comme une résultante, par propagation de proche en proche à travers les chocs entre particules, de la pesanteur (Massignat, 2000). Gassendi écrit par exemple :

C'est-à-dire que l'air qui pèse au voisinage se trouve, par l'effet d'une propagation de la pesanteur qui se transmet depuis la surface de l'atmosphère, dans un tel état de compression que, le mercure se trouvant à une altitude moindre, l'air exerce une pression plus forte ; à une altitude plus élevée, une pression moins forte ; enfin l'altitude restant la même, il égale la poussée de ce mercure, et lui est équivalent en poids, ou lui fait équilibre.

Charleton, utilisant un rapport de la densité du mercure à celle de l'air de 14000, estime à 10 km la hauteur du cylindre d'air nécessaire pour équilibrer le poids du mercure, valeur très en deçà de celle déduite des crépuscules, ainsi que l'avait déjà noté Torricelli. Boyle refait le même calcul six ans plus tard, et trouve une valeur similaire, qu'il juge être du même ordre de grandeur que la valeur trouvée par Kepler à partir de la mesure de la réfraction atmosphérique.

Boyle avait déjà fait, dès les années 1650, des expériences pour caractériser la dilatabilité de l'air avec sa *Machine du vide*, mais rencontrait des oppositions, notamment celle de Linus, contre les objections duquel il écrit son mémoire intitulé *Spring and weight of the air* en 1662. Pour convaincre son détracteur, Boyle fait l'expérience du tube courbé renversé, qu'on trouve aussi précisément décrite par Hooke dans ses *Micrographia* en 1667, et montre que le seul ressort de l'air peut soutenir beaucoup plus que les 29 pouces (73 cm) de mercure équilibrant la pression atmosphérique, s'il est comprimé, concluant que la force élastique varie en raison inverse du volume, loi aujourd'hui dite de Boyle-Mariotte. Mariotte réalise des expériences comparables, décrites dans son *Discours de la nature de l'air* paru en 1667, et arrive aux mêmes conclusions que Boyle et Hooke. Hooke expose dans ses *Micrographia* en termes parfaitement clairs la question de l'extension verticale de l'atmosphère :

J'imagine que l'air du haut peut toujours s'étendre d'une nouvelle fois sa hauteur, voire, peut-être indéfiniment, ou au-delà de la lune ; car les élasticités et les dilatations variant dans des proportions réciproques, ne pouvant trouver de limite ultime au-delà de laquelle l'air ne s'étendra pas, nous ne pouvons déterminer la hauteur de l'air [...] en effet, puisque (pour autant que j'ai pu jusqu'à présent l'expérimenter) l'Air semble capable d'une expansion indéfinie, la pression peut être diminuée à l'infini, et par conséquent son expansion vers le haut être aussi poursuivie à l'infini.

Il fournit par là-même une clé d'explication de la différence entre la hauteur barométrique faisant l'hypothèse d'une atmosphère homogène (≈ 10 km) et la hauteur estimée par les crépuscules (≈ 80 km). Edmond Halley, dans son *Discours de la loi de décroissance de la hauteur du mercure dans le baromètre* (1687), établit quelques années plus tard un modèle plus

précis. Utilisant un rapport de la densité du mercure à celle de l'air de 10800, plus proche de la réalité que le rapport de 14000 utilisé par Charleton et Boyle, il calcule une hauteur de l'atmosphère, supposée homogène, de 8 km, dont il précise qu'elle est une limite inférieure puisqu'il faut tenir compte de la dilatation de l'air avec la hauteur. Il calcule qu'à 65 km d'altitude, l'air est raréfié d'un facteur 3000, et à 85 km de 30 000, et se sert de la hauteur mesurée par les crépuscules (d'après lui 71 km) pour juger qu'une dilatation de l'air d'un facteur 3000 est possible. Pour Hooke, comme on peut le lire à l'entrée AIR du Lexicon (1704), l'air serait une solution, ou une teinture, de particules terrestres et aqueuses dissoutes dans l'éther, à la façon dont le sel se dissout dans l'eau, ce qui expliquerait l'énorme pouvoir de compression et de dilatation de l'air, puisqu'une très petite quantité de teinture peut colorer de très grandes quantités de solvant, et à l'inverse une grande quantité de colorant peut être concentrée dans un très petit volume de solvant.

A l'entrée ÆTHER du même dictionnaire, cette conception de Hooke, qui revient à remplacer le vide des atomistes par l'éther comme milieu où se meuvent les particules, est jugée par l'auteur de l'article « *favoriser la doctrine cartésienne du plein absolu* », même s'il estime possible qu'une matière éthérée suffisamment fine pour ne pas entraver le mouvement des corps célestes puisse emplir les régions entre les planètes. Cette matière peut être assimilée au milieu subtil de Newton, dont on trouve à l'entrée ETHER de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751) la description suivante :

Newton, après avoir ainsi établi l'existence de ce milieu éthéré, passe à ses propriétés, & dit qu'il est non seulement plus rare & plus fluide que l'air, mais encore beaucoup plus élastique & plus actif ; & qu'en vertu de ces propriétés, il peut produire une grande partie des phénomènes de la nature. C'est, par exemple, à la pression de ce milieu que Newton semble attribuer la gravité de tous les autres corps ; & à son élasticité, la force élastique de l'air & des fibres nerveuses, l'émission, la réfraction, la réflexion, & les autres phénomènes de la lumière ; comme aussi le mouvement musculaire, &c. On sent assez que tout cela est purement conjectural

La découverte du poids et de l'élasticité de l'air ruine par contre l'hypothèse stoïcienne d'un air céleste semblable en nature à l'air que nous respirons, tout au moins présent en quantités significatives, puisque suivant le calcul de Newton (*Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1687) :

j'ai trouvé [...] qu'à la hauteur d'un demi diamètre de la terre au-dessus de sa surface, l'air doit être plus rare qu'ici-bas en une raison beaucoup plus grande que celle de tout l'espace renfermé dans l'orbe de Saturne à un globe d'un pouce de diamètre. Donc un globe d'air d'un pouce de diamètre qui aurait la densité qu'a notre air à un demi diamètre de la terre au-dessus de sa surface, remplirait toutes les régions des planètes jusqu'à la sphère de Saturne & bien loin encore au-delà...

Comme le note Goldstein (1976), Hooke fait dans ses *Micrographia* un pas décisif en affirmant que, compte-tenu de l'augmentation des dilatations avec la hauteur, ce sont les couches situées en bas, dans les premiers kilomètres, qui jouent un rôle prépondérant dans la réfraction atmosphérique :

Je pense qu'il est très rationnel de supposer que la plus grande courbure des rayons se fait le plus près de la Terre, et que l'inflexion des rayons, au-dessus de 3 ou 4 miles [4,8 ou 6,4 km], est très peu sensible, et donc que par ce moyen, les calculs de la hauteur des montagnes, tels qu'ils sont faits à partir de la distance à laquelle elles sont visibles sur l'horizon, en supposant que le rayon qui nous vient de leur sommet est une ligne droite [...], alors qu'il est en fait une courbe, sont largement erronés.

Cette remarque ouvre la porte, ou devrait l'ouvrir, à la réconciliation entre la faible hauteur réfractive de l'atmosphère trouvée par Kepler quarante années auparavant, puis retrouvée par Jean-Dominique Cassini, dans la première table des réfraction publiée en 1662, puis la seconde incluant les résultats de l'expédition de Richer à Cayenne, permettant de préciser l'inclinaison de l'écliptique et la parallaxe du soleil, en 1672, et la valeur de la hauteur déduite des crépuscules depuis le XI^{ème} siècle.

Malgré ces deux constats faits par Hooke dès 1667, à savoir que l'effet réfractif est concentré en bas, dans les premiers kilomètres, et que l'atmosphère s'étend selon toutes probabilités jusqu'à une hauteur au minimum comparable à celle déduite des crépuscules, le désaccord apparent entre les deux estimations est l'argument initial, qui sera par la suite accompagné d'autres objections, sur lequel s'est bâtie l'idée d'une matière réfractive distincte de la matière atmosphérique pesante. L'objectif de l'analyse qui suit est de comprendre les arguments scientifiques qui ont conduit à introduire la matière réfractive, et notamment de voir comment ce débat s'est inscrit dans la querelle entre cartésiens et atomistes qui a marqué l'Académie des Sciences durant la première moitié du XVIII^{ème} siècle.

3. Arguments pour l'introduction d'une matière réfractive différente de l'air

Nous avons dénombré dans la littérature de la première moitié du XVIII^{ème} siècle cinq motifs invoqués à l'introduction d'une matière réfractive distincte de l'air.

3.1 Argument basé sur l'infirmation par l'observation de la théorie de la réfraction par les vapeurs et exhalaisons

L'idée que les vapeurs et les exhalaisons jouent un grand rôle dans la réfraction de la lumière des astres a été soutenue par Christoph Rothmann à la toute fin du XVI^{ème} siècle (Péous, 2010). Rothmann, dans la lignée de Jean Pena, soutient qu'il n'y a pas de frontière entre la couche d'air qui recouvre la terre et l'éther. Pour lui, l'air que nous respirons et la matière céleste sont de même nature. C'est sur la base de l'absence supposée d'effet de la réfraction atmosphérique sur les distances apparentes entre étoiles depuis l'horizon jusqu'au zénith que Jean Pena avait nié l'existence des sphères des planètes, de la sphère du feu, et de l'éther, autant d'éléments qui introduisent des frontières et devraient générer une effet sensible de la réfraction. Mais entre-temps, Tycho Brahé a mesuré précisément la réfraction des étoiles, phénomène dont on ne peut plus nier l'existence, et soutient l'idée d'une frontière entre l'air et l'éther responsable de cette réfraction. Les échanges entre Rothmann et Tycho Brahé dans la décennie 1580 sont vifs, le second concédant la possibilité d'une transition continue entre air élémentaire d'en bas et air pur d'en haut, revenant malgré tout à la dichotomie air-éther, mais ne se résolvant pas à l'idée d'un ciel aérien d'une unique nature. Rothmann résout la contradiction entre l'existence d'effets observés de la réfraction et sa conception d'un ciel liquide, aérien et continu, sans dichotomie air-éther, en invoquant le rôle des vapeurs. Il écrit :

Qu'Alhazen et Vitellion affirment en effet qu'un astre qui passe par la verticale du lieu, est plus proche à l'horizon du pôle du monde et plus éloigné au point culminant, cela n'est pas [dû] à un diaphane différent des orbés célestes, mais aux vapeurs, qui sont toujours présentes près de l'horizon.

Son explication, qui est l'accumulation de vapeurs et d'exhalaisons terrestres au voisinage de l'horizon terrestre, avec une extension angulaire au-dessus de l'horizon n'excédant pas 20°, revient à remplacer la limite air-éther par une limite vapeur-air, les vapeurs étant supposées plus denses que l'air élémentaire, et la frontière entre l'air des hautes couches et les vapeurs plus denses des basses couches conduisant bien à une réfraction d'un milieu moins dense vers

un milieu plus dense. Cette idée est très certainement inspirée de l'explication avancée par Aristote, et les penseurs du Moyen-Âge, du phénomène de l'illusion lunaire par la réfraction, et rappelle également le modèle proposé par Vitellion trois siècles plus tôt. On se souvient qu'Aristote attribuait l'effet d'agrandissement de la lune aux particules des nuages, plutôt qu'aux vapeurs qui en sont à l'origine. Kepler, au tout début du XVII^{ème} siècle, reprend les idées échangées entre son maître Tycho Brahé et Rothmann, et bien que réceptif à la doctrine de Pena, il ne partage pas l'opinion de Rothmann sur le rôle des vapeurs proches de l'horizon. Pour lui, les réfractions se produisent à la surface de « *l'air que nous respirons* », ce qui l'amène notamment à l'estimation d'une hauteur de 3,6 km pour l'atmosphère, supposée homogène, en 1621.

L'idée que les vapeurs jouent un rôle important dans la réfraction atmosphérique est reprise par les cartésiens un siècle plus tard. Elle est théorisée par Nicolas Hartsoeker, un savant hollandais associé à l'Académie des Sciences à partir de 1699, et ami de Cassini. Il partage l'opinion de Descartes suivant laquelle les rayons de lumière passent plus librement à travers un milieu dur et structuré qu'à travers une substance molle et désorganisée. Il écrit dans son cours de physique (1730) :

Comme la Terre est environnée d'un air chargé d'exhalaisons & de vapeurs, qui donne un passage plus libre aux rayons de lumière qu'un air où il n'y en a point, parce que dans le premier la matière, qui sert à transmettre les rayons de lumière, est plus emprisonnée & par conséquent moins agitée & plus faible que l'autre ; les rayons de lumière, qui viennent de quelque Astre, doivent souffrir une certaine réfraction en s'approchant de la perpendiculaire. Et comme ces rayons trouvent pour ainsi dire une même matière subtile & également libre à passer dans l'éther que dans l'air, ils ne doivent pas souffrir cette réfraction principalement dans leur passage de l'éther dans l'air, mais dans celui d'un air sans vapeurs & sans exhalaisons, à un autre qui en est chargé, & de celui-ci dans un autre qui en est plus chargé & où elles sont plus condensées &c. Ainsi ce n'est pas la différente densité de l'air en tant qu'air, qui cause la réfraction des rayons qui le traversent comme on pourrait le croire faussement; mais ce sont les vapeurs & les exhalaisons qui voltigent dans l'air, & leur différente quantité & condensation qui causent cet effet ; comme on le peut prouver de ce que les rayons de lumière souffrent sensiblement la même réfraction, en passant du verre dans le vide pneumatique, que du verre dans l'air libre.

Hartsoeker s'inscrit donc, quant à la réfraction atmosphérique, dans le système de pensée développé par Rothmann un siècle plus tôt. Il donne l'argument que le passage de l'air au verre

se fait de façon quasiment analogue à celui du vide pneumatique au verre, pour attribuer à la matière solide (« condensation » des vapeurs et exhalaisons) le rôle déterminant dans la réfraction atmosphérique. Comme « *l'air est d'autant plus chargé d'exhalaisons & de vapeurs qu'il est proche de la Terre* », un rayon de lumière incident venant d'un astre doit subir une série de réfraction et suivre une ligne courbe jusqu'à la surface de la terre. Hartsoeker insiste, dans la tradition d'Aristote, sur le rôle majeur de la phase condensée des vapeurs dans la réfraction :

Ainsi il n'y a pas de quoi s'étonner que cette réfraction est différente dans un même endroit de la Terre, non seulement suivant que l'air y est plus ou moins chargé de vapeurs & d'exhalaisons, mais aussi & principalement, suivant qu'elles y sont plus ou moins condensées, & par conséquent suivant que la matière subtile qui s'y trouve, & qui sert à transmettre les rayons de lumière, y est plus ou moins enfermée & comme emprisonnée.

Hartsoeker explique l'effet observé de la température sur la réfraction par l'effet de la température sur le degré de condensation des vapeurs :

Ces réfractions doivent donc être plus grandes en hiver qu'en été, parce que les exhalaisons & les vapeurs qui les causent ne montent guère haut en hiver, mais qu'elles demeurent condensées & en quantité vers la surface de la Terre ; & elles doivent pour les mêmes raisons être plus grandes vers les Pôles, que vers les Tropiques & vers l'Équateur, où les réfractions horizontales sont à peu près d'un tiers moindres qu'à Paris, où elles élèvent l'Astre d'un demi degré, & où elles sont presque deux fois moindres qu'à 65 degrés.

Il estime les réfractions :

[...] plus grandes quand le Baromètre est haut, & qu'il y a beaucoup d'exhalaison, & de vapeurs invisibles dans l'air, que lorsque le Baromètre est bas & que l'air a été comme lavé & purgé de ces exhalaisons & de ces vapeurs ; enfin plus grandes au bord de la Mer dans un temps calme avec un vent de terre, qui laisse l'air fort tranquille, que lorsque la Mer a été grosse & que cet air est encore fortement agité, ce qui doit diminuer la réfraction.

Fontenelle confirme le rôle important des vapeurs à propos des observations de Jacques Cassini à l'Observatoire de Marseille, tenu par le Père Laval, et de l'interprétation que Cassini fait de ces mesures (1706) :

Ce fut principalement à l'occasion de la mesure de la terre, commencée en 1669, qu'on s'aperçut des différentes réfractions d'un objet vu sur la terre. Elles sont d'autant plus grandes, qu'il est plus élevé, ou plus éloigné, plus grandes le matin qu'à midi, & qu'aux heures correspondantes après-midi, différentes en différents jours, le tout sans aucune proportion bien connue. Tout cela peut s'expliquer par différentes couches de vapeurs répandues dans l'air, les inférieures plus grossières que les supérieures, plus mêlées ensemble & moins différentes, lorsque le soleil a eu le temps d'agir sur elles. La quantité, la consistance & le mélange de ces vapeurs dépendent d'une trop grande combinaison de causes particulières, pour nous permettre aucune détermination précise.

Dans un article consacré au modèle à décroissance linéaire de la densité de Jacques Cassini, qui porte à 14 km la hauteur de la couche réfractive, à comparer à la valeur de 3,6 km déduite par son père, et avant lui Kepler, dans l'hypothèse d'une atmosphère homogène et d'un trajet rectiligne de la lumière, Fontenelle écrit (1714) :

M. Cassini trouve en effet que les calculs fondés sur cette hypothèse répondent assez juste aux observations, & beaucoup mieux que ceux de l'hypothèse rectiligne : mais en même temps il ne dissimule pas que ses calculs sont quelquefois démentis. Il arrive, surtout en hiver, que les réfractions observées vers l'horizon sont plus grandes que celles de sa table ; assez souvent ensuite elles deviennent plus petites; après quoi, à de plus grandes hauteurs, elles se remettent d'accord avec la table. La cause de ces irrégularités ne paraît pas fort cachée. Le peu de mouvement que les vapeurs grossières ont en hiver, principalement le matin & le soir, les tient moins élevées au-dessus de la terre, & rassemblées dans un espace beaucoup moindre que celui où un plus grand mouvement les aurait répandues. La partie de cet espace qu'elle n'occupent point, est plus nette, & par-là moins réfractive qu'elle n'eût été dans une autre saison. Le haut de la matière réfractive est plus égal en tout temps.

Il attribue ainsi clairement aux vapeurs grossières, concentrées par le froid dans les basses couches de l'atmosphère, le surcroît de réfraction horizontale mesuré l'hiver par rapport à ce qui est observé l'été au même endroit. L'influence de la température n'est donc considérée qu'en tant qu'elle concentre les vapeurs, supposées responsables de la réfraction, à proximité de la terre.

Néanmoins, des divergences entre le modèle de réfraction par les exhalaisons et l'observation sont mentionnées dès le début du siècle par Fontenelle (1706). A propos de l'horizon de la mer, que Laval trouve plus bas, quand « *la mer a été grosse* » et l'air « *rempli à l'horizon d'une brume déliée* », indiquant donc une atmosphère moins réfractive (puisque la réfraction élève l'horizon apparent), il écrit :

Cependant ces circonstances auraient pu faire croire que l'air plus chargé de vapeurs aurait dû la [la réfraction] rendre plus forte.

Il semblerait de même que la réfraction d'un Astre vu au travers d'un nuage devrait être plus grande.

Elle ne l'est pourtant pas, & c'est ce que M. Cassini & le P. Laval ont observé plusieurs fois. De là M. Cassini conjecture qu'il pourrait y avoir dans l'air une matière réfractive différente de l'air.

Constatant que les prédictions d'un modèle privilégiant le rôle des vapeurs et exhalaisons, et surtout de leurs parties condensées (particules des brumes et des nuages), sont contredites par l'observation, il avance l'idée qu'il pourrait y avoir une matière réfractive différente de l'air. Ainsi, c'est pour ne pas remettre en question la présence supposée massive d'impuretés au voisinage de la terre, que les savants français de l'époque résolvent la contradiction entre mesures et modèles en inventant une matière réfractive spécifique.

3.2 Argument basé sur les valeurs élevées des réfractions horizontales à haute latitude

Suite à un voyage scientifique en Laponie avec le roi de Suède au solstice d'été 1694, effectué malheureusement un peu trop tard après le solstice, Philippe de La Hire refait à l'été 1695 le voyage avec André Spole pour mesurer précisément la réfraction horizontale du soleil, et publie ses observations (1700). A partir de la hauteur méridienne du soleil mesurée à Torneo (65°40' N), corrigée de la réfraction, ils calculent que le bord supérieur du soleil à minuit devrait se trouver 35' au-dessous de l'horizon les 10 et 11 juin. Mesurant la hauteur de ce bord supérieur à minuit, qu'ils trouvent être de 23' au-dessus de l'horizon, ils en déduisent une valeur de la réfraction horizontale de 58', valeur presque double de celle prévalant à nos latitudes (31'). Le 14 juin, à Kangis, donc un peu plus au nord, des réfractions horizontales trois fois supérieures à la valeur des moyennes latitudes sont enregistrées. Jean-Dominique Cassini analyse également ces observations (1700) en utilisant son modèle de réfraction de 1662, affiné en 1672 après l'expédition de Cayenne. Il confirme une valeur double des valeurs observées à moyenne latitude, de 59'18'' à Torneo, voisine de la valeur estimée par La Hire, mais juge les autres observations, notamment celle de Kangis, peu exploitables. Ne pouvant, faute d'observations suffisantes, estimer à la fois le pouvoir réfractif (à partir de la réfraction à une hauteur significative au-dessus de l'horizon) et la hauteur de l'atmosphère (à partir de la réfraction horizontale), il se fixe la hauteur déduite de son modèle de 1662 (3,6 km), et ajuste le pouvoir

réfractif pour reproduire la réfraction horizontale. La valeur trouvée est 45 (indice de réfraction : 1,00045), à comparer à une valeur mesurée de 28 à nos latitudes (J. Cassini, 1700).

Jacques Cassini publie une traduction de l'article de Lowthorp publié en 1699 dans les Philosophical Transactions relatant la mesure en laboratoire des angles de réfraction dans le verre, l'eau et l'air (1700). Ces mesures ne montrent pas de proportionnalité générale entre la pesanteur des corps et leur pouvoir réfractif, par exemple quand on compare le verre à l'eau, mais une proportionnalité est mise en évidence par Lowthorp entre l'air et l'eau, avec une application potentiellement décisive à la représentation de la réfraction de la lumière des astres par l'atmosphère, dont on connaît la répartition verticale depuis l'établissement de la loi de Boyle-Mariotte. Lowthorp écrit :

L'on peut conjecturer de là que les densités de l'air & de l'eau sont proportionnelles à leurs puissances réfractives ; & si l'on peut confirmer cela des expériences que l'on ferait dans la suite par le moyen de cylindres vides d'air à différents angles d'incidence en divers changements d'air, il serait plus que probable que les puissances réfractives de l'Atmosphère sont partout à toutes les hauteurs au-dessus de la terre proportionnelles à leurs densités & à leurs raretés. Et il ne serait pas difficile de connaître par-là quelle est la trace que doit faire la lumière au travers de l'Atmosphère pour terminer l'ombre de la terre, & d'examiner à quelle distance il faut que la Lune soit pour souffrir des Éclipses dont la durée a été observée.

Lowthorp trouve une puissance réfractive de l'air à Londres de 36, nettement supérieure à la valeur estimée par Cassini en 1662 à Boulogne, à savoir 28. Remarquons que ces valeurs sont estimées de manière très différentes, l'une localement par une mesure de réfraction, l'autre à partir d'un modèle de réfraction appliqué à la lumière des astres, intégrant donc les propriétés de l'atmosphère sur toute sa hauteur. Voici le commentaire que fait Jacques Cassini de ces résultats :

Si l'on peut compter sur cette expérience qui a été faite en Angleterre, cela servira à confirmer que les réfractions de l'air sont plus grandes plus l'on approche du Pôle, puisqu'à Boulogne, qui est à 44°.30' de hauteur, la puissance réfractive est de 28; à Londres dont la hauteur est de 51°.30', elle est de 36. & à Torneo dont la hauteur est de 65. 40. elle est de 45. Cela n'est pas précisément à proportion des différences des hauteurs du Pôle ; car par les observations faites à la Cayenne, la puissance réfractive résulte de près de 27. peu différente de celle de Boulogne, que l'on a trouvée de 28.

Ainsi, même s'il existe une progression à la hausse du pouvoir réfractif aux latitudes croissantes, cette progression n'est pas régulière, et ne montre pas de cohérence évidente. Cassini note que l'air de Londres étant plus grossier (sans doute à cause de ses brouillards), cela peut expliquer l'excès de pouvoir réfractif trouvé par Lowthorp, l'air grossier, chargé de vapeurs condensées comme on l'a vu précédemment, étant a priori plus réfractif. Il note également que la hauteur de l'air peut influencer les écarts entre pouvoirs réfractifs dans différents lieux (puisque un excès de hauteur peut être confondu avec un excès de pouvoir réfractif, si celui-ci est estimé en se basant sur une valeur erronée de la hauteur), l'air de Londres pouvant être plus haut que celui de Boulogne.

Voici, quant à l'observation d'une réfraction horizontale double en Laponie, la conclusion de La Hire (1700) :

Mais il y a encore une Remarque à faire, laquelle est fort considérable, que la partie de l'air qui cause les Réfractions, n'a point de rapport avec celle qui fait sa pesanteur, puisqu'il arrive à Stockholm & à Paris les mêmes changements du mercure dans le tuyau du Baromètre, & qu'on y a aussi observé les mêmes hauteurs à très peu près.

Cette remarque de la Hire, suggérant l'existence d'une matière réfractive non pesante, montre que l'effet de la température de l'atmosphère, qui joue sur la distribution verticale de sa densité, n'est à cette époque pas compris à l'Académie des Sciences. Bien que les premiers thermomètres aient été mis en service dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle, on ne dispose pas encore de mesures de température systématiques à différentes altitudes. Certes, l'idée que le froid augmente la réfraction horizontale par concentration des vapeurs et exhalaisons dans les basses couches a été émise, mais la question de l'influence directe de la température sur la densité de l'air lui-même, donc son pouvoir réfractif, si tant est qu'il en ait un, ne semble pas présente dans les esprits. La situation est différente outre-Manche, Newton étant pleinement conscient du rôle intrinsèque de la température, comme le montre sa correspondance des années 1694-1695 avec John Flamsteed, traduite et publiée par Jean-Baptiste Biot en 1836 dans le Journal des Savants. Newton écrit à Flamsteed à ce sujet :

La cause de l'inégalité des réfractions près de l'horizon, pour la même hauteur (à différents jours), je tiens que c'est l'inégale chaleur de l'air dans les basses régions de l'atmosphère; car lorsque l'air est raréfié par la chaleur, il réfracte moins ; lorsqu'il est condensé par le froid, il réfracte plus. Et cette différence doit devenir plus sensible lorsque la route des rayons lumineux suit, pendant un grand

nombre de milles, la basse région de l'air ; cette région seule étant raréfiée et condensée par les alternatives du chaud et du froid, tandis que la région moyenne et supérieure de l'air est toujours froide. Je suis en outre d'opinion, qu'à toutes les hauteurs apparentes plus grandes, la réfraction est modifiée tant soit peu par les variations du poids de l'air que le baroscope (baromètre) décèle. Car, lorsque l'air est plus lourd et conséquemment plus dense, il doit réfracter un peu plus que lorsqu'il est plus léger et plus rare. C'est pourquoi je désirerais que, dans celles de vos observations où il faut tenir compte de la réfraction, vous voulussiez bien noter le poids indiqué par le baroscope, ainsi que la chaleur de l'air, afin que, par la suite, on puisse avoir égard à la variation de la réfraction produite par ces deux causes, lorsque l'on connaîtra la proportion suivant laquelle elle en résulte.

Ayant compris le rôle majeur joué par la température sur la réfraction atmosphérique dans les régions inférieures de l'atmosphère, le froid se traduisant par une « condensation » (une compression) de l'air, le chaud par une « dilatation », il demande à Flamsteed d'accompagner ses mesures de réfraction, non seulement de mesures de pression, mais aussi de température. En l'absence de connaissances quantitatives sur l'impact de la température sur la dilatation de l'air, Newton ne peut prendre en compte physiquement l'effet de la température dans le modèle de réfraction qu'il développe à cette époque, mais il a pleinement conscience du problème. De façon très intéressante, Newton aboutit à la conclusion inverse des cartésiens, à savoir que la présence de vapeurs traduit un certain état thermique de l'atmosphère, et que c'est cet état thermique de l'air qui contrôle la réfraction :

Et, en effet, la raréfaction et la condensation de l'air par la chaleur et le froid paraissent avoir, sur les réfractions, une influence beaucoup plus grande que nous ne l'avons jusqu'ici soupçonné ; car même ces fortes réfractions que vous avez attribuées aux vapeurs de la mer et aux brouillards, me paraissent, en y repensant (« upon second thoughts »), résulter de la condensation de l'air par le froid ; car, lorsqu'on voyage, on trouve toujours l'air plus froid sur l'eau que sur la terre, et à un degré très considérable, et conséquemment l'eau doit refroidir l'air jusqu'à quelques toises de hauteur au-dessus d'elle ; et en le refroidissant elle le condense et accroît son pouvoir réfringent. Cela est certainement une cause de ces réfractions, et je tiens que c'en est une cause suffisante. Mais, quant aux vapeurs, nous n'avons pas, à ma connaissance, d'expériences pour prouver qu'elles augmentent la réfraction de l'air, si ce n'est peut-être en le refroidissant; et si l'air qui repose sur la surface de la mer était surchargé de vapeurs, il ne serait pas assez transparent pour laisser voir, à travers le canal, la ville de Calais avec ses maisons et ses clochers.

Cette correspondance ne sera publiée en France que quarante ans plus tard, la démarche de modélisation de Newton, qui avait abouti à la publication sans commentaires de sa table des

réfractions par Halley en 1721 dans les Philosophical Transactions, étant alors reprise, contrôlée point par point, expliquée et mise à la lumière par Biot. Il faudra attendre le milieu du XVIII^{ème} siècle pour que soit introduit explicitement dans les modèles d'atmosphère utilisés pour le calcul de la réfraction le coefficient de dilatation thermique de l'air, déterminé expérimentalement entre temps. Biot considère Newton comme « *le créateur de la théorie des réfractions astronomiques comme il l'est de la théorie de la gravitation* ».

3.3 Argument basé sur la valeur trop grande de la réfraction horizontale prévue par le modèle barométrique

Newton s'attèle en 1695 à la construction de sa table des réfractions par la résolution mathématique de l'équation de propagation du rayonnement dans son hypothèse corpusculaire. Il se donne deux modèles possibles d'atmosphère. Le premier est un modèle à décroissance linéaire de la densité avec l'altitude, dont il démontre qu'il implique une proportionnalité entre la pression et le carré de la densité. Ainsi que le note Biot (1854), il faudrait, pour que ce modèle soit compatible avec la loi de Boyle-Mariotte, introduire une décroissance de la température assurant la diminution d'élasticité de l'air avec l'altitude qui convient. Biot fait ce calcul, en introduisant le coefficient de dilatation de l'air, et trouve une décroissance avec l'altitude de la température trois fois trop grande par rapport au gradient thermique observé. Il trouve, en utilisant la méthode suivie par Newton, une réfraction horizontale de 30', un peu faible, mais proche de la réalité. Dans un deuxième modèle, Newton suppose la pression proportionnelle à la densité, ce qui implique une température constante avec l'altitude, et se traduit par la décroissance exponentielle prévue par la loi de Boyle-Mariotte de la densité avec l'altitude. La réfraction horizontale déduite du modèle est dans ce cas de 39', donc beaucoup trop grande, la réfraction à 80° étant par contre correcte. Il construit un modèle mixte entre les deux hypothèses précédentes en effectuant une succession de quadratures paraboliques qui lui prend de nombreux mois de travail, et conduit à l'établissement d'une table des réfractions donnant la valeur correcte de la réfraction horizontale, table qui sera publiée par Halley en 1721. Un travail similaire, mais plus étayé, car utilisant les nombreuses observations de la réfraction faites au long du XVIII^{ème} siècle, et tirant partie des progrès analytiques réalisés, incluant la prise en compte de la température, sera publié par Laplace en 1805, et ne sera pas surpassé par la suite (Biot, 1850).

D'une manière générale, les modèles utilisant la vraie loi (p proportionnel à n) sont moins bons que ceux à décroissance linéaire (p proportionnel à n^2) près de l'horizon, ce qui justifia l'utilisation prioritaire de la progression arithmétique, plutôt que logarithmique, par ceux qui entreprirent d'élaborer des tables des réfractions dans la première moitié du XVIII^{ème} siècle, comme l'a fait par exemple Jacques Cassini (1714). La décroissance linéaire fut souvent attribuée à une matière réfractive distincte de l'air. Thomas Simpson, dans ses dissertations mathématiques (1743) identifie clairement, dans la continuité de Newton, la question de la température comme étant à l'origine du désaccord entre la variation verticale de la densité requise pour expliquer la réfraction horizontale, et la variation vraie résultant de la loi barométrique :

Et la seule objection matérielle (que je vois) à laquelle les Tables de réfraction sont susceptibles de donner lieu est qu'elles sont fondés sur une supposition, à savoir que la densité de l'atmosphère diminue uniformément avec la hauteur, ce qui est non seulement très différent de ce qui a été communément admis jusqu'à présent, mais apparemment contraire à l'expérience, par laquelle il est prouvé que la densité de l'air diminue comme la force de compression : Mais on peut répondre que, bien que cela soit vrai pour l'air contenant partout un égal degré de chaleur, on ne peut pas le supposer pour l'atmosphère terrestre, puisque sa région supérieure est connue pour être beaucoup plus froide, et par conséquent d'élasticité beaucoup plus faible que celle de la région proche de la surface de la terre.

Jérôme de La Lande, dans son *Astronomie* (1764), exprime les incertitudes qui d'après lui subsistent encore quant à cette question. Il mentionne l'explication de Simpson, mais en cite d'autres, montrant que la question de la matière réfractive est encore loin d'être réglée au milieu du XVIII^{ème} siècle à l'Académie des Sciences, les partisans d'un pouvoir réfractif lentement variable avec l'altitude, contrairement à la densité de l'air qui obéit à la loi de Boyle-Mariotte, restant apparemment puissants :

[...] la réfraction, ou en général la force attractive des corps sur les rayons de lumière, ne dépend pas seulement de leur densité, mais aussi d'une cause interne qui est peut-être la structure de leurs parties, leur distribution, leurs interstices, leur viscosité, leur adhérence, leur électricité, leur qualité plus ou moins huileuse, plus ou moins inflammable [...] ainsi rien n'empêche de croire que la matière réfractive change de densité d'une manière uniforme en s'élevant au-dessus de la Terre, quoique cela ne soit pas vrai pour l'air grossier. Quoique les expériences faites sur notre air condensé fassent paraître la réfraction proportionnelle à la densité, il peut arriver que la matière électrique, plus abondante dans la région supérieure de l'atmosphère, rende la réfraction plus grande à une certaine

hauteur qu'elle ne devrait être, si l'air était homogène avec celui que nous respirons; par là il peut arriver que la force réfractive approche bien plus de l'uniformité que de la progression géométrique.

3.4 Argument basé sur l'écart jugé trop grand entre la hauteur réfractive et les hauteurs déterminées par les autres méthodes

On trouve dans l'article déjà cité (1714), sous la plume de Fontenelle, la remarque suivante à propos de la hauteur de 3,6 km déduite par Cassini en 1662 :

Cette hauteur de deux mille toises qui n'est pas d'une lieue, est beaucoup plus petite que celle de six lieues & demie que donnent à l'atmosphère ceux qui lui donnent le moins, comme Messieurs Cassini & Maraldi ; car il y en a d'autres qui vont à dix-huit ou vingt. L'atmosphère ne serait donc réfractive que dans une petite partie de son étendue, & dans ses couches les plus basses, ou, si l'on veut, la matière réfractive serait différente de l'atmosphère.

Mais l'hypothèse d'où l'on tire cette hauteur de deux mille toises est que le rayon rompu vienne à l'œil en ligne droite, & l'hypothèse peut bien n'être pas vraie. Il est possible que la matière réfractive soit uniforme & homogène ; mais il y a plus d'apparence que sa densité est inégale, & augmente toujours en approchant de la terre ; & alors le rayon rompu décrit une courbe, & la ligne par laquelle nous voyons l'astre, est une tangente de cette courbe...

[...]

En prenant donc pour un arc de cercle la courbe décrite par le rayon rompu, & la réfraction horizontale étant toujours de 32 minutes 20 secondes , M. Cassini trouve la hauteur de la matière réfractive près de trois fois et demie plus grande que quand le rayon était supposé s'étendre en ligne droite.

La valeur de 6,5 lieues, soit 26 km, correspond à l'estimation de 12800 toises proposée par Jacques-Philippe Maraldi (1703) sur la base des pressions mesurées à différentes altitudes sur des montagnes d'Auvergne, du Languedoc et du Roussillon durant l'année 1701. La difficulté de ces mesures tenait à la nécessité d'une estimation géométrique des altitudes de ces différentes montagnes. Ces mesures ont été faites par triangulation, via des estimations de hauteurs apparentes relatives, ensuite calées en absolu d'après les hauteurs véritables sur la mer des montagnes proches de la mer. En utilisant ces données barométriques, jointes à celles obtenues par Cassini à Marseille en 1662, et celles de La Hire faites en 1672, Maraldi s'efforce de trouver la « règle, avec laquelle le mercure diminue, à différentes hauteurs de l'air sur la surface de la mer ». Il trouve, sur la gamme d'altitude couverte, qui s'étend jusqu'à près de 2000 m, un bon accord avec une croissance linéaire de la dilatation de l'air avec l'altitude. Cette correspondance

altitude–pression est destinée à permettre la mesure de l’altitude où l’on se trouve sur une montagne quelconque de la terre. Au-delà de l’objectif altimétrique, Maraldi déduit une estimation de la hauteur de l’atmosphère. Il obtient cette hauteur en sommant les épaisseurs de 336 couches, la couche la plus basse au-dessus du sol, d’épaisseur 20 m, représentant 1 ligne de mercure sur les 336 lignes correspondant à la hauteur du mercure au niveau de la mer. La croissance de l’épaisseur de la couche est à chaque nouvelle couche de 30 cm. La sommation sur les 336 couches donne 25600 m. L’épaisseur de la dernière couche au sommet de l’atmosphère est trouvée de 132 m, avec donc une dilatation d’un facteur 6,6, la densité au sommet de l’atmosphère dans ce modèle étant réduite du même facteur. On doit remarquer, ce que ne fait pas Maraldi, que la valeur de la hauteur trouvée par cette méthode dépend de l’incrément de pression choisi. Choisir un pas de 1/10 ligne, par exemple, conduirait à une altitude de 195 km, avec une dilatation de la couche haute d’un facteur 561. La hauteur trouvée par Maraldi est telle que la dernière couche au sommet de l’atmosphère, ramenée à la surface et comprimée en conséquence, correspond peu ou prou à la résolution du baromètre (1 ligne). La valeur trouvée dépend donc des performances de l’instrument de mesure. Rappelons par ailleurs que la valeur de la hauteur de l’atmosphère déduite par Jacques Cassini de son modèle de réfraction appliqué à une atmosphère avec décroissance linéaire de la densité est de 14 km, supérieure aux 3,6 km trouvés par son père, mais inférieure aux 25 km proposés par Maraldi.

Concernant les autres valeurs, « *qui vont à dix-huit ou vingt* » lieues, il s’agit de la hauteur déduite de la durée des crépuscules, que nous avons déjà évoquée, mais également de la hauteur estimée des globes de feu dont à l’époque on pense, avec Descartes et suivant la doctrine aristotélicienne, qu’ils sont d’origine atmosphériques et flottent à la surface de l’atmosphère. Au début du XVIII^{ème} siècle, on dénombre déjà quelques observations bien documentées. Le bolide du 21 mars 1676 observé dans le ciel de Bologne a fait l’objet d’un essai publié par Montanari (*Fiamma Volante*), qui en a été le témoin direct. Son altitude a été estimée à 60 km. Ce globe de feu, ainsi que trois autres apparus sur l’Allemagne et l’Angleterre entre 1680 et 1708, constituent, avec le bolide qui a survolé l’Angleterre en 1708, le sujet d’un article visionnaire de Edmond Halley paru en 1714 dans les *Philosophical Transactions*. Halley s’y livre à une reconstitution minutieuse de la trajectoire du bolide de 1708. Il s’interroge sur les raisons d’une vitesse si considérable et d’une trajectoire si parfaitement horizontale, sur la nature de la substance enflammée, et conclut à l’origine extra-terrestre du bolide. Halley n’est pas le premier à évoquer une origine extraterrestre des globes de feu. John Wallis, en 1677, avait publié un article dans lequel il avait émis l’hypothèse que le bolide apparu sur l’Angleterre

en 1676 pourrait être une petite comète qui est passée près de la Terre, et avait fait le rapprochement avec la comète parue en mai 1677. Halley reviendra néanmoins sur sa position quelques années plus tard dans son analyse du survol de l'Angleterre par le bolide de 1719 (cf chap. 5).

La reprise de l'activité aurorale au début du XVIII^{ème} siècle, après un siècle de très faible activité solaire (petit âge glaciaire), est un fait marquant. Des savants tels que Edmond Halley en Angleterre et Jean-Jacques Dortous de Mairan en France sont invités par leurs académies respectives à enquêter sur ce phénomène, qui inquiète les populations, et fournir une explication rationnelle. L'abbé Bertholon consacre un chapitre de son long article du Dictionnaire de physique (1793) sur les aurores boréales à la question de la hauteur de l'aurore, regardée par les physiciens comme ayant son siège dans l'atmosphère terrestre. Il écrit :

[...] ; mais ces deux moyens [durée du crépuscule et pression de l'air] ne peuvent servir à déterminer exactement l'atmosphère , prise non pour l'amas d'air grossier qui est autour de la terre, mais pour le fluide quelconque qui enveloppe à une plus grande distance le globe de la terre & qui participe à ses mouvements.

[...]

Cet académicien [Mairan] osa avancer, en 1726, à l'occasion de l'aurore boréale du 19 octobre, qu'il fallait que la matière de ce phénomène eût été à plus de soixante-dix lieues au-dessus de la surface de la terre ; & que s'il en jugeait par quelques observations particulières , sa hauteur serait plus grande. Cette proposition étonna alors, parce qu'on était alors dans le préjugé que l'atmosphère avait peu de hauteur.

[...]

De quelques autres observations correspondantes faites à de plus petites distances, & qui sont en grand nombre, on a également conclu que la hauteur du phénomène était à 100, 200 & 300 lieues.

Cette question sera détaillée au chapitre suivant (cf chap. 3). On voit donc qu'en ce début du XVIII^{ème} siècle, de nouveaux indices s'accroissent en faveur d'une atmosphère de grande hauteur, même si les mesures basées sur l'estimation par triangulation de la hauteur des arches aurorales, que d'aucuns jugent être des illusions propre à l'œil de l'observateur comme l'est l'arc-en-ciel, restent controversées jusqu'au milieu du siècle suivant.

On peut néanmoins se demander pourquoi les savants français se sont autant centrés sur cette apparente contradiction entre faible hauteur réfractive et grande hauteur estimée par d'autres

méthodes (mesures de pression, globes de feu, crépuscules) sachant que Hooke, comme nous l'avons dit, avait compris dès 1667 que la loi de décroissance exponentielle impliquait que le phénomène de réfraction soit concentré dans les premiers kilomètres au-dessus de la surface. Sans aucun doute, le fait que la réfraction horizontale ne puisse pas être correctement représentée par un modèle à décroissance exponentielle, un modèle à décroissance linéaire de la densité, tel que celui utilisé par Maraldi pour son estimation de la hauteur de l'atmosphère, ou Jacques Cassini pour son estimation de la hauteur réfractive, convenant mieux, a contribué à occulter la proposition, pourtant raisonnable, de Hooke. Notons cependant que l'existence de la matière réfractive reste, dans l'esprit des savants français, une hypothèse, comme l'exprime bien Maraldi dans son article de 1703 :

Les expériences que M. Cassini avait faites à Marseille, & qui s'accordent avec celles que nous avons faites dernièrement, ayant donné la hauteur de l'air beaucoup plus grande que celle qui résulte des hypothèses qu'il avait employées à déterminer les réfractions Astronomiques, lui donnèrent lieu de conjecturer qu'il pourrait y avoir quelque matière fluide répandue dans la partie inférieure de l'air, & peu élevée sur les plus hautes montagnes de la terre, qui fût la cause principale des réfractions des Astres. Ces observations faites tant au bord de la mer, que sur les plus hautes montagnes, serviraient à connaître si cette matière réfractive différente de celle de l'air, est, en effet dans la nature, au lieu que jusqu'à présent il ne la propose que pour une invention commode pour le calcul des réfractions.

Maraldi note le caractère commode pour le calcul des réfractions de la matière réfractive, ce qu'illustre parfaitement le travail de modélisation analytique de la réfraction présenté par Pierre Bouguer dans son mémoire de 1729, qui sera récompensé par l'Académie des Sciences. Bouguer entame son mémoire par un raisonnement destiné à justifier l'existence d'une matière réfractive et la paramétrisation qu'elle permet, qu'il est intéressant de détailler.

3.5 Argument basé sur le jugement que la loi des sinus implique une conséquence absurde sur la trajectoire des rayons lumineux

Bouguer s'attaque dans son mémoire à la résolution de l'équation différentielle régissant la trajectoire d'un rayon lumineux dans l'atmosphère. Il travaille en géométrie sphérique, avec une loi de variation des dilatations (inverses des densités) en puissance m de la distance r au centre de la Terre. Et voici de quelle façon Bouguer justifie l'adoption d'une telle loi :

En effet l'air pris à une grande hauteur au-dessus de la terre, est mille fois & dix mille fois plus dilaté qu'ici-bas ; & ainsi, si les sinus des angles d'incidence & de réfraction, suivaient le rapport simple de ces dilatations, comme l'ont supposé presque toutes les personnes qui ont traité ce sujet, un rayon de lumière qui serait d'abord horizontal, devrait se rompre si considérablement dans l'Atmosphère, qu'il deviendrait presque vertical, avant de parvenir jusqu'à nous. C'est ce qui nous a obligé de supposer que les réfractions étaient causées dans l'Atmosphère par une matière différente de l'air, & que nous avons appelée réfractive. Mais si on ne veut point admettre l'existence de cette matière, nous ne nous en mettons point en peine. Car les sinus des angles d'incidence & de réfraction, qui ne sont point proportionnels aux dilatations de l'air, le sont certainement à quelque puissance ou à quelque fonction de ces dilatations.

L'argument de Bouguer est infondé physiquement (même dans le contexte des connaissances de l'époque), les sinus des angles d'incidence et de réfraction ne suivant pas le rapport simple des dilatations, mais celui des indices de réfraction. On retrouve une confusion similaire dans le traité publié par Philippe de la Hire (1702) :

[...] & tous les sinus des angles que fait le rayon lumineux, seront entre eux dans la raison de la compression ou réduction des particules de l'atmosphère, ou bien ces sinus doivent être entre eux dans la raison des moindres facilités que le rayon rencontre en traversant ces milieux de différente densité. Car je suppose que la facilité que la lumière a de se mouvoir dans des milieux de différentes densités, est dans la raison de la densité ou resserrement, ou réduction des particules qui composent ces milieux.

Une analyse détaillée de la raison de cette confusion dépasserait le cadre de cette analyse. Il semble probable que le flou qui règne autour de la notion de *densité* des milieux et de *résistance* que ces milieux opposent aux rayons lumineux chez les théoriciens de la réfraction à cette époque (Jullien, 1992) est cause de l'erreur. Erreur salutaire qui sert à Bouguer à justifier l'existence d'une matière réfractive, avec laquelle il est beaucoup moins contraint de se plier à la réalité physique de l'atmosphère. Son calcul de la réfraction est correct puisque, de fait, les coefficients qu'il dérive des réfractions observés sont tels que ce n'est pas la dilatation qui varie comme r^m , mais l'indice de réfraction. Autrement dit, il assimile tout au long de sa démonstration l'indice de réfraction à la dilatation (ou plutôt son inverse). Mayrargue (2009) ne note pas cette erreur, mais insiste à juste titre sur la mathématisation du problème permise par l'introduction de cette hypothèse d'une matière réfractive, qui permet une paramétrisation du problème, et, comme le dit Bouguer, le choix entre une « *infinité* » de modèles, beaucoup plus riche qu'un choix entre quelques modèles particuliers. A cette confusion près, sa

formulation du problème s'inscrit dans une stricte application des lois de Snell-Descartes, et consiste à intégrer une équation différentielle le long du trajet du rayon lumineux.

4. Discussion

Nous discuterons la question de la matière réfractive, à partir des éléments présentés dans la section précédente, suivant trois axes qui nous paraissent pertinents. Tout d'abord sous l'angle de la découverte de l'atmosphère physique par les observateurs, démunis devant la complexité des phénomènes, et qui inventent la matière réfractive comme un recours contre l'ignorance dans laquelle ils sont du système atmosphérique global, en l'absence d'un nombre suffisant d'observations et d'outils mathématiques adaptés. Ensuite suivant le paradigme du conflit entre les cartésiens et les newtoniens à l'académie des sciences française dans la première moitié du XVIII^{ème} siècle, le système du monde cartésien fournissant aux inventeur de la matière réfractive des arguments pour la défendre, le concept ne s'étant pas, notons-le, développé outre-Manche. Enfin, nous inscrirons la problématique dans le contexte de l'opposition entre géomètres classiques et mathématiciens utilisant le calcul différentiel, qui est liée à la précédente, pour souligner le caractère bénéfique, ainsi que l'a déjà noté Mayrargue (2009), de l'introduction de la matière réfractive qui permet un saut qualitatif important dans le traitement analytique de la réfraction atmosphérique, à l'origine des progrès qui conduiront Laplace, un siècle plus tard, à montrer que la matière réfractive n'est plus utile pour décrire la réfraction atmosphérique.

4.1 Les observateurs et la matière réfractive

La découverte de la pesanteur de l'air au milieu du XVII^{ème} siècle fait passer l'atmosphère d'objet mathématique, étudié par les penseurs arabes inventeurs de la théorie des crépuscules, et plus tard par Kepler à travers sa représentation de la réfraction de la lumière des astres, au statut d'objet physique, directement mesurable au laboratoire et dans la nature, et imprimant sa marque complexe à la surface de la terre par l'intermédiaire des phénomènes météorologiques. La mesure météorologique, rendue possible par l'invention du baromètre par Torricelli en 1644, mais aussi de l'anémomètre, redécouvert par Hooke en 1667, et du thermomètre, dont la technique ne sera maîtrisée qu'au XVIII^{ème} siècle par Fahrenheit et quelques autres, permet les premières observations multi-instrument de l'atmosphère, marquées par la découverte de sa

complexité et de sa variabilité, autant spatiale que temporelle. Les premiers essais d'interprétation des variations du baromètre sont faits dans un article déjà cité de Halley (1687). Après avoir étudié la structure verticale de l'atmosphère, Halley pointe la complexité des phénomènes atmosphériques :

J'ai considéré ici l'air & l'Atmosphère, comme un corps, où il n'arrive point d'altération, qui pèse toujours sur la surface de la terre 800 fois moins que l'eau, & qui est capable de raréfactions & de condensation à l'infini. Or aucune de ces suppositions n'est vraie prise à la rigueur, car on sait qu'ici en Angleterre le poids de toute l'Atmosphère, n'est pas toujours le même, puisqu'il est quelquefois balancé par 28 ponces & 1/2 de Mercure, & qu'il en faut d'autres fois 30 1/2, de sorte que, selon ces expériences, l'air est quelquefois plus léger d'une quinzième partie, qu'il n'est en une autre rencontre. Outre cela le froid & le chaud dilatent & compriment l'air très considérablement, & par conséquent changent sa pesanteur. A quoi il faut encore ajouter les exhalaisons des parties insensibles, qui s'échappent de presque tous les corps, & qui demeurent suspendues en l'air, à peu près comme les particules des sels que l'on a dissous dans quelque liqueur, qui y sont répandues & qui y nagent parmi celles qui composent la liqueur, dans laquelle ces sels ont été dissous. Or ces particules sont beaucoup plus pesantes que l'air, & doivent nécessairement augmenter sa pesanteur, comme les sels dissous dans l'eau.

Il se livre ensuite à une analyse des causes de la variation du baromètre en commençant par les vapeurs et les exhalaisons émanant de la terre. Il suggère, sur la base de mesures de pression faites sur une montagne, que la raréfaction de l'air par la chaleur se traduit par un écartement entre ses particules où viennent se loger vapeurs et exhalaisons que la chaleur fait s'évaporer, celles-ci alourdissant l'air dilaté et contrebalançant l'effet d'allègement lié au réchauffement, et réciproquement. De sorte qu'effets de température et de chargement en vapeurs se contrebalancent à peu près, n'induisant pas de changement de pression notable. Quant à la partie haute de l'atmosphère, toujours froide et que les vapeurs n'atteignent pas, leur poids ne varie pas non plus sensiblement. Ayant dit cela, il conclut, avec une intuition remarquable (compte-tenu de l'absence totale de connaissance du sujet à cette époque) « *que la principale cause de l'élévation, & de la chute du Mercure, est le changement des Vents qui arrive dans les Zones tempérées, & qui est fort fréquent en Angleterre, comme tout le monde le sait* », et se livre à une analyse de différentes situations météorologiques. Il attribue par exemple une basse pression à un air léger qui ne peut plus soutenir les vapeurs pesantes, qui par conséquent tombent en pluie, et une haute pression à la rencontre de deux vents contraires qui pressent localement l'air et l'élèvent, faisant croître en poids la colonne d'air pressé.

Dans un tout autre ordre d'idée, Newton croit l'atmosphère humide plus légère que l'atmosphère sèche, la seconde résultant pour lui de la décomposition à chaleur très élevée d'un corps plus dense et compact que la première, conséquence de l'ébullition de l'eau à chaleur modérée. On lit à l'entrée AIR de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert un intéressant passage sur cette question :

Or comme il [Newton] prétend que tous les corps ont un pouvoir attractif & répulsif, & que ces deux qualités sont d'autant plus fortes dans les corps, qu'ils sont plus denses, plus solides, & plus compacts ; il en conclut que quand par la chaleur, ou par l'effet de quelque autre agent, la force attractive est surmontée, & les particules du corps écartées au point de n'être plus dans la sphère d'attraction, la force répulsive commençant à agir, les fait éloigner les unes des autres avec d'autant plus de force qu'elles étaient plus étroitement adhérentes entre elles, & ainsi il s'en forme un air permanent. C'est pourquoi, dit le même Auteur, comme les particules d'air permanent sont plus grossières, & formées de corps plus denses que celles de l'air passager ou des vapeurs, le véritable air est plus pesant que les vapeurs, & l'atmosphère humide plus légère que l'atmosphère sèche.

L'idée que les vapeurs et exhalaisons augmentent la pesanteur de l'air (cf chap. 7), donc la pression atmosphérique, est par contre communément admise à cette époque dans la communauté française, tant par les cartésiens que par les atomistes. On peut lire dans l'Abrégé de Philosophie de Gassendi publié par F. Bernier (1684) :

Or pour dire en passant ce qui fait que lorsque le Vent du Septentrion, qui est un Vent moins impétueux, & plus égal souffle, l'air est alors plus pesant, c'est qu'il est plus dense, & plus épais, & il est plus dense, parce que les exhalaisons, & les vapeurs terrestres qui sont mêlées entre ses corpuscules lui sont tellement adhérentes qu'elles font comme un seul, & unique corps avec lui ; [...]
Et au contraire lorsque le Vent de Midi, qui est d'ordinaire un Vent plus impétueux souffle, l'air est alors plus léger, parce qu'il est plus pur, ou moins dense, & il est plus pur, parce que l'impétuosité du Vent qui souffle transversalement pousse ailleurs les exhalaisons.

Pour Hartsoeker, les réfractions sont « plus grandes quand le Baromètre est haut, & qu'il y a beaucoup d'exhalaisons, & de vapeurs invisibles dans l'air, que lorsque le Baromètre est bas & que l'air a été comme lavé & purgé de ces exhalaisons & de ces vapeurs ». Fontenelle écrit : « Entre les Tropiques, le Baromètre en général s'élève moins que dans les pays Septentrionaux, ce qui marque sûrement que l'air de la Zone Torride est plus léger, & ce plus de légèreté s'accorde bien avec de moindres réfractions ». Pour les savants français du XVII^{ème} siècle et

de la première moitié du XVIII^{ème} siècle, les variations du baromètre proviennent essentiellement des vapeurs et exhalaisons qui s'ajoutent ou se retranchent à l'air élémentaire et modulent ainsi la pesanteur de l'air. Cette conception résulte de l'idée que les vapeurs humides, dans la vision aristotélicienne, s'accumulent dans les régions basses et intermédiaires de l'atmosphère sous forme d'air grossier et peuvent se transformer en pluie, plus lourde que l'air puisqu'elle tombe, et par ailleurs du rôle important qui a été attribué depuis le moyen-âge aux vapeurs dans la réflexion et la réfraction des rayons lumineux, tant pour ce qui concerne la durée du crépuscule, que pour expliquer le phénomène déjà mentionné de l'illusion lunaire. Le fait que les vapeurs en se condensant deviennent visibles (nuages, pluie), l'air élémentaire étant par contre invisible, « synonyme » de légèreté et de pureté, est attribué à cette époque à une part très significative des vapeurs dans la masse atmosphérique globale, la contribution des vapeurs aux variations de pression atmosphérique étant jugée importante.

Les multiples contradictions relevées au tournant du XVIII^{ème} siècle dans les mesures de réfraction atmosphérique effectuées à différentes latitudes et en différentes saisons, pour lesquelles les observateurs ne sont pas encore armés des outils mathématiques pour les comprendre, ni d'un accès au paramètre « température », dont ils ne perçoivent pas toute l'importance, du moins du côté français, expliquent l'invention de la matière réfractive, dans un contexte d'incertitudes fortes qu'exprime bien Fontenelle (1706) :

Mais d'ailleurs le Baromètre ne s'élève pas plus à Stockholm qu'à Paris, du moins selon les observations d'un certain nombre d'années, quoique les réfractions de Stockholm aient toujours été plus grandes. Voilà bien des contrariétés apparentes, qui éloignent beaucoup l'établissement d'un système; il suffit maintenant de ramasser tous les sujets d'incertitude, & peut-être quand ils seront en assez grand nombre, produiront-ils quelque certitude ou quelque vraisemblance.

L'introduction de cette matière réfractive ne fait, dans la représentation de l'atmosphère issue du XVII^{ème} siècle, qu'ajouter un constituant supplémentaire aux nombreuses matières déjà supposées participer à la composition de l'air. En 1664, Henry Power, membre de la Société Royale de Londres, décrit, à la suite de Boyle, l'atmosphère comme un milieu pesant, dont la pression varie avec l'altitude, et capable d'expansion, et son air comme un « *corps mixte d'Effluves Lumineuses et Magnétiques, que poudrent les puissants Atomes Célestes venus du haut, et les Vapeurs et Exhalaisons de ce Globe terraqueé montant du bas* ». Kepler, au début du XVII^{ème} siècle, décrivait déjà l'air que nous respirons comme un corps matériel traversé de

puissances de diverses natures (de mouvement, magnétique, calorique, lumineuse). On retrouve à l'entrée AIR du Lexicon (1704) une division en 3 types des corpuscules de l'air : (i) les exhalaisons et les vapeurs émises par la terre, la mer, les animaux, les végétaux et les minéraux, dues à la chaleur du soleil ou du monde souterrain ; (ii) les particules subtiles émanant des corps célestes, par exemple des comètes pour régénérer les vapeurs terrestres selon Newton, et les flots de particules magnétiques expliquant selon Descartes l'action de l'aimant ; (iii) les corpuscules élastiques de l'air à proprement parler, formant l'air « élémentaire ». L'un des arguments utilisés pour introduire la matière réfractive, à savoir la réfraction horizontale double en région polaire, alors que la pression est de même grandeur, implique le caractère non pesant de la matière réfractive qui, dans la classification précédente, doit être rangée dans le type (ii). Cette matière réfractive, n'étant pas soumise à la pesanteur, présente le grand « avantage » de ne pas être tenue de respecter la loi des dilatations de Boyle-Mariotte. Remarquons par ailleurs les précautions de langage prises par la plupart des auteurs, présentant la matière réfractive comme une possibilité, sans jamais l'affirmer comme une réalité avérée.

4.2 Les cartésiens et la matière réfractive

Jacques Cassini, observateur et cartésien convaincu, joue un rôle dominant dans la première moitié du XVIII^{ème} siècle pour promouvoir l'idée d'une hauteur considérable de l'atmosphère, idée qui lui permet *in fine* de proposer une mise en conformité de la dynamique keplerienne avec la théorie des tourbillons de Descartes.

Dans une première étape de cette extension radicale de la hauteur de l'atmosphère, estimée jusqu'alors à ≈ 80 km, Cassini travaille sur les mesures de pression faites au sommet des montagnes, dont par ailleurs les altitudes étaient mesurées par triangulation, lors d'un voyage scientifique effectué en 1700 pour tracer la méridienne de l'Observatoire jusque dans le sud de la France (1733). Les mesures de pression au sommet des plus hautes montagnes ayant été récemment complétées à l'occasion d'une mission cartographique en Languedoc, Cassini dispose à présent d'un échantillonnage complet qui permet une comparaison exhaustive des mesures de pression en fonction de l'altitude où elles sont réalisées. Cette comparaison est faite en référence aux variations attendues d'après la loi de Boyle-Mariotte. Les résultats montrent des abaissements de pression avec l'altitude beaucoup plus importants que ne le prévoit la loi des dilatations. En l'absence d'une explication physique raisonnable (il ne semble pas entrevoir

le rôle crucial de la température), Cassini décide, suite à cette étude, de représenter la variation observée de la dilatation avec l'altitude comme une loi de puissance (en l'occurrence un exposant 2, au lieu de 1 d'après la loi de Boyle-Mariotte) du poids comprimant de l'air :

Nous avons considéré pour cet effet, que puisque suivant les expériences de M. Mariotte, l'air renfermé dans un tube se condense à proportion des poids dont il est chargé, & que cette règle ne s'observe pas dans la dilatation de l'air observée sur les Montagnes lorsqu'il est libre, il faut nécessairement que l'air en liberté suive d'autres règles que lorsqu'il est renfermé.

Comme il serait difficile de déduire cette règle immédiatement de quelque cause Physique, parce qu'il faudrait connaître la nature du ressort de l'air, nous avons supposé que cette dilatation se fait dans la raison réciproque du carré des poids dont il est chargé.

Suivant cette hypothèse, dont il dit qu'elle est encore en dessous de la réalité, il indique que l'extension verticale de l'air chargé du poids d'une ligne de mercure atteint plus de 2000 km.

Fontenelle (1738) commente un travail ultérieur de Jacques Cassini visant à mettre en conformité la dynamique des tourbillons de Descartes avec les lois de Kepler. Cassini se demande quelle devrait être la hauteur de l'atmosphère, pour que l'ensemble formé de la terre et de son atmosphère, considéré comme un bloc solidaire indéformable, tourne sur lui-même précisément en 24 heures. En effet, il considère que le mouvement de rotation du tourbillon terrestre lui est communiqué par frottement sur l'éther environnant et, pour satisfaire les lois de Kepler, l'altitude de l'interface doit se situer à la hauteur à laquelle un corps en rotation autour de la terre tournerait en 24 h. C'est précisément l'altitude de ce que nous appelons aujourd'hui l'orbite géostationnaire, soit environ 40000 km. Fontenelle écrit :

Il en résulte que l'Atmosphère aura bien 10 000 Lieues de hauteur. Toutes nos expériences vont toujours de plus en plus à augmenter la hauteur de l'Atmosphère, & en dernier lieu nous l'avons vu en 1733. Il fallait déjà que cette hauteur allât bien au-delà de 500 Lieues, mais il paraît que 20 fois au-delà, ce soit beaucoup. Il est fort possible cependant que ce soit l'imagination seule qui s'effraie, parce qu'elle n'est pas encore accoutumée à cette idée. Que l'on conçoive le demi-diamètre de la Terre ou des 1500 lieues qu'il a réellement, ou de 10 000 [lieues], ce n'est presque également rien par rapport aux 33 millions de Lieues dont est le demi-diamètre de l'Orbe de la Terre.

Dans le même article, Fontenelle relate également le calcul de la hauteur de l'atmosphère du soleil suivant les mêmes hypothèses. En conclusion, dit-il, c'est « une grande présomption en faveur du Système de M. Cassini, que toutes les rotations que l'on connaît, & qui peuvent être

calculées par la Règle de Kepler, soient trop lentes, & que la simple considération d'une Atmosphère ou constante par le fait, ou plus que vraisemblable par l'analogie, fasse tout rentrer dans la Règle ».

L'Observatoire de Paris est dirigé à cette époque par Jacques Cassini, et par ailleurs Fontenelle, l'un des derniers défenseurs de la théorie des tourbillons de Descartes, est secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences. Les savants importants qui travaillent à cette époque sur la hauteur de l'atmosphère, Jacques-Philippe Maraldi (cousin de Cassini) à partir des mesures de pression, Jean-Jacques Dortous de Mairan en observant les aurores boréales, celui-ci prenant la succession de Fontenelle au secrétariat perpétuel en 1740, et dans une moindre mesure Philippe de la Hire, qui se spécialise dans la méthode des crépuscules, sont tous dans la mouvance cartésienne, et tous convaincus à divers titres de la grande hauteur de l'atmosphère. Alors que Kepler avait tenté, au début du XVII^{ème} siècle, d'imposer la mesure de la hauteur par la réfraction, prévoyant une valeur faible, contre la hauteur déduite des crépuscules estimée par les savants arabes du XI^{ème} siècle, les savants français de la fin du XVII^{ème} siècle et de la première moitié du XVIII^{ème} siècle étendent au contraire l'atmosphère vers le haut. Jacques Cassini triple la valeur de la hauteur réfractive estimée par Kepler, puis par son père, mais cette hauteur reste modérée, et il est l'un des premiers, avec Maraldi et La Hire, à invoquer l'existence d'une matière réfractive de faible épaisseur recouvrant la terre. Il semble clair que l'absence de prise de conscience à l'Académie des Sciences du rôle majeur de la température atmosphérique dans la réfraction horizontale, rôle reconnu dès la fin du XVII^{ème} siècle par Newton outre-Manche (dans une correspondance qui ne sera diffusée qu'un demi-siècle plus tard), ouvre la voie à des hypothèses qui vont conduire les cartésiens à surestimer la hauteur de l'atmosphère, ce qui va dans le sens de réconcilier la théorie des tourbillons de Descartes avec les lois de Kepler. Nous sommes à deux ans de la décision par l'État de financer les expéditions de Laponie et du Pérou destinées à la mesure des degrés de méridiens au pôle et à l'équateur, moins de dix ans avant la reconnaissance définitive de l'aplatissement au pôle scellant la défaite des cartésiens, et la tension entre cartésiens et newtoniens est forte à l'Académie.

L'incohérence entre la théorie de la réfraction donnant un rôle majeur aux vapeurs et aux exhalaisons, telle que défendue par Hartsoeker et découlant directement de la vision aristotélicienne, partiellement reprise par Descartes, et certaines observations ne montrant pas de lien entre réfraction et particules en suspension, qui amène également, comme nous l'avons vu, à postuler l'existence d'une matière réfractive, est à ranger également au chapitre du biais

cartésien. Nous avons vu que Newton a attribué un rôle majeur à la température de l'air, celle-ci contrôlant la présence, ou non, de vapeurs, contrairement aux cartésiens pour qui c'est au contraire par l'intermédiaire des vapeurs que la température influe sur la réfraction. La focalisation des savants cartésiens de l'époque sur le rôle supposé majeur des vapeurs les a certainement empêché de réaliser le rôle prééminent de la température, que Newton, puis Simpson, décriront correctement, même si de façon seulement empirique jusqu'à l'établissement de modèles mathématiques intégrant la prise en compte explicite de la température au milieu du XVIII^{ème} siècle, en premier lieu par l'astronome allemand Tobias Mayer.

L'absence de prise en compte de l'effet de la température, même de façon intuitive, comme l'a fait Newton avant même qu'il soit possible de mathématiser le problème par l'utilisation de coefficients de dilatation thermique de l'air, est aussi responsable du défaut de compréhension de la raison pour laquelle un profil à décroissance linéaire de la densité représente mieux la réfraction horizontale qu'un profil établi en fonction de la loi de Boyle-Mariotte. Là encore, la focalisation des savants cartésiens sur le profil à décroissance linéaire de la densité, considéré (à juste titre, mais sans en comprendre la cause) comme représentant mieux la réfraction dans les basses couches, les conduit à instaurer un profil de densité de la matière réfractive non contraint par les lois de la physique, qu'il ne savent pas lui appliquer, profil qu'ils distinguent du profil physique de la matière atmosphérique pesante.

4.3 Les mathématiciens et la matière réfractive

Le mémoire de Pierre Bouguer déjà cité, publié en 1729, marque une date importante, les mathématiciens utilisant l'analyse infinitésimale héritée de Newton et Leibniz ayant été jusqu'alors ostracisés à l'Académie. C'est, nous l'avons vu, en invoquant l'existence d'une matière réfractive, à partir d'un faux argument confondant densité et pouvoir réfractif, que Bouguer justifie sa paramétrisation de l'indice de réfraction en loi de puissance de la distance au centre de la Terre. Plus généralement, comme le note Mayrargue (2010), le renouvellement au début du XVIII^{ème} siècle de la génération historique des savants intégrés à l'Académie des Sciences à sa création n'a pas été immédiat, le conflit entre géomètres classiques et mathématiciens utilisant l'approche infinitésimale s'inscrivant dans celui qui oppose cartésiens et newtoniens. De ce point de vue, la récompense attribuée au mémoire de Bouguer trace la voie d'une nouvelle physique, et représente une victoire des newtoniens. Ceux qui ne prennent

pas le tournant du calcul infinitésimal, comme Philippe de la Hire, avec son modèle purement géométrique de rayons suivant une épicycloïde (1702), n'apportent pas de contribution décisive à la discipline. L'école anglaise des mathématiciens travaillant à la même époque sur le même problème (Brook Taylor, Thomas Simpson) utilise explicitement la théorie corpusculaire de Newton, combinée à l'analyse infinitésimale, en exprimant l'évolution le long du rayon de la vitesse de la lumière, qui augmente avec la profondeur, selon Newton. Toutes ces approches convergent vers des solutions analytique voisines, pour ne pas dire identiques, quelle que soit la manière d'arriver au résultat, et la vision physique qui fonde le calcul. De nombreuses tables des réfractions sont élaborées dans le courant du XVIII^{ème} siècle. Ainsi, l'introduction de la matière réfractive, qui libère les mathématiciens de la contrainte inhibitrice de la réalité physique, et leur permet de paramétriser la variation des paramètres atmosphériques, pour ensuite mieux représenter cette réalité, est incontestablement un facteur qui va favoriser le progrès scientifique.

En 1805, Laplace publie un modèle très complet de la réfraction atmosphérique, dans lequel la densité atmosphérique est développée en série de Taylor par rapport à la distance r au centre de la Terre. En supposant la décroissance exponentielle correcte, il trouve une réfraction trop grande d'environ 15%. Il note que, la température diminuant avec l'altitude, la densité décroît moins vite vers le haut que l'exponentielle supposée, ce qui tend à diminuer la réfraction horizontale et se rapprocher du cas d'une densité uniforme. Il suppose, comme Bouguer, que l'indice de réfraction varie comme une puissance de r , un paramètre qu'il ajuste ensuite. En supposant une décroissance arithmétique de la pression, tout en respectant les mesures barométriques, ce qui nécessite d'ajuster le profil vertical de température, il trouve une valeur de la réfraction horizontale inférieure de 15% à la valeur observée. Il en déduit que la vérité se trouve entre le modèle à température uniforme et le modèle à décroissance linéaire de la densité. Le gradient thermique imposé par la décroissance arithmétique de la pression est néanmoins trop faible par rapport à la valeur observée par Gay-Lussac lors de son vol aérostatique de 1804, et il faut le corriger pour tenir compte des mesures de température. Or, en le corrigeant, on se rapproche justement de la réfraction horizontale observée. Laplace parvient ainsi à réconcilier la mesure de température avec la mesure de réfraction, élément crucial identifié un siècle plus tôt par Newton, proposant le meilleur modèle, au sens de la contrainte par l'observation, jamais réalisé. Il conclut à ce sujet, dans son *Système du Monde* (1835) :

En adoptant une hypothèse qui participe des deux progressions, on parvient à représenter à la fois toutes les observations du baromètre et du thermomètre à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère et les réfractions astronomiques, sans recourir, comme quelques physiciens l'ont fait, à un fluide particulier qui, mêlé à l'air atmosphérique, réfracte la lumière.

5. Conclusion

L'invention de la matière réfractive s'inscrit dans une vision de l'atmosphère, la « sphère des vapeurs » héritée d'Aristote. Les vapeurs, et les particules en suspension auxquelles elles donnent lieu en se condensant, sont supposées jouer un rôle déterminant dans la réflexion et la réfraction de la lumière. C'est cette sphère des vapeurs dont Ibn Mu'adh, au XI^{ème} siècle, a calculé la hauteur par la méthode des crépuscules, l'air transparent, celui que nous respirons, ne pouvant, selon les savants arabes de l'époque, nous renvoyer la lumière du soleil. C'est également cette sphère des vapeurs, concentrée au voisinage de la terre, qui est supposée être responsable de l'agrandissement de la lune, dont elle réfracte les rayons, au voisinage de l'horizon, ainsi que le pensent par exemple Vitellion au XIII^{ème} siècle, ou Rothmann trois siècles plus tard. Kepler, au début du XVII^{ème} siècle, ne croit, ni aux vapeurs sur l'horizon qui agrandiraient l'image de la lune, ni aux particules qui nous réfléchiraient la lumière du soleil durant les crépuscules, mais l'empreinte de cette conception reste très forte au XVII^{ème} siècle et durant la première moitié du XVIII^{ème} siècle. Kepler abaisse à seulement quelques kilomètres la hauteur de l'atmosphère, sur la base de son modèle de réfraction atmosphérique, le premier du genre, repris par Cassini un demi-siècle plus tard, et donne des arguments contre la valeur élevée de la hauteur de l'atmosphère déduite des crépuscules. Les arguments de Kepler, qui ne seront analysés dans le détail qu'un siècle plus tard par La Hire, ne pèsent guère face à la découverte et à la mesure, au milieu du XVII^{ème} siècle, du poids de la colonne d'air par Torricelli, et à l'établissement de la loi de Boyle-Mariotte, qui conduisent à la représentation d'une atmosphère se raréfiant vers le haut, susceptible d'atteindre une hauteur similaire à celle déduite des crépuscules, voire les hauteurs encore supérieures tirées de l'observation des globes de feu, puis des aurores boréales. Mais les savants de la fin du XVII^{ème} siècle se heurtent à la même difficulté que Kepler, à savoir que la couche atmosphérique responsable de la réfraction, sur la base des observations et des modèles de plus en plus élaborés développés pour les interpréter, semble concentrée au voisinage de la terre, dans les premiers kilomètres. Les anglais, nous l'avons vu, parviennent rapidement à une vision unifiée, réconciliant les différentes hauteurs mesurées, notamment grâce à Hooke. Mais les cartésiens français, très

attachés à l'idée d'une atmosphère lourdement chargée en particules, celles-ci constituant selon eux le principal facteur de variation de la pression mesurée par le baromètre, et au fait que la réfraction est essentiellement due à la composante solide de l'atmosphère, cherchent dans les vapeurs et exhalaisons, par nature concentrées au voisinage de la terre, la cause de cette réfraction. Ils ne la trouvent pas, plusieurs faits observationnels contredisant leur théorie. Plutôt que de revoir leur conception d'un rôle déterminant des particules dans la réfraction, très fortement ancrée dans le système aristotélicien, et ce que Descartes en a repris, ils préfèrent imaginer une matière réfractive, qui nécessairement doit être non pesante pour expliquer les écarts de réfraction horizontale mesurés entre nos latitudes et les régions polaires, alors que les pressions barométriques sont voisines. Tandis que Newton comprend la nature de l'influence de la température sur la distribution verticale de l'air comme facteur explicatif possible des écarts observés, Cassini et ses collègues de l'Académie ne voient dans la température qu'un facteur influençant la distribution verticale des vapeurs, celles-ci devant selon eux constituer le déterminant primaire de la réfraction. L'émergence de la matière réfractive résulte donc d'un conflit entre une vision héritée de la pensée grecque, à savoir le rôle majeur des particules dans la réfraction, suivant le vieux paradigme de l'illusion lunaire, et l'inférence moderne, à partir de l'observation astronomique et des modèles de réfraction, de la faible hauteur de l'atmosphère, introduite par Kepler, qui ne croit pas lui-même au rôle des vapeurs. L'idée naturelle selon laquelle la faible hauteur réfractive refléterait la concentration des particules au voisinage de la terre est battue en brèche par l'observation, et c'est pour résoudre cette contradiction que les savants français de l'époque, héritiers à la fois d'Aristote et de Kepler, et qui ne saisissent pas le rôle essentiel de la température comme paramètre déterminant de la structure verticale de l'atmosphère, font appel à la matière réfractive, ce qui leur permet de ne pas sacrifier le premier héritage, tout en s'inscrivant dans la voie tracée par le second. Et de manière caractéristique, la supposition de l'existence d'une matière réfractive, libérant les imaginations, permet aux mathématiciens de progresser dans la modélisation de la réfraction atmosphérique, ce qui les conduira à développer les nouvelles méthodes du calcul infinitésimal et, *in fine*, à abandonner leur hypothèse initiale lorsque ces modèles seront parvenus, un siècle plus tard, à une représentation satisfaisante de la réfraction. L'exemple de la matière réfractive illustre à la fois la naissance de la science atmosphérique comme science expérimentale, par la confrontation entre observations et modèles, générant scepticisme et avancées conceptuelles, et l'inscription des communautés scientifiques concernées dans des paradigmes spécifiques, comme le montre les différences d'approches entre savants anglais et français, que la communication scientifique à travers les revues des deux Académies (et *Philosophical*

Transactions) ne suffit pas à faire converger au XVIII^{ème} siècle. L'utilisation du calcul infinitésimal constitue néanmoins un point commun entre les deux Écoles, malgré les difficultés que va rencontrer l'Académie des Sciences française à renouveler la génération des premiers scientifiques la rejoignant à sa création, dans un contexte d'évolution rapide des méthodes mathématiques à la disposition des astronomes. Il faut aussi remarquer que l'étude de l'atmosphère à cette époque était principalement faite par des astronomes sous l'angle de son interaction avec la lumière des astres, notamment la réfraction, et que ce n'est qu'au XIX^{ème} siècle que la météorologie va se développer de manière autonome à partir de l'héritage de savants tels que Cassini ou Halley, astronomes ayant contribué à asseoir la science atmosphérique en tant que telle.

Chapitre 3. Matière solaire

1. Introduction

La matière solaire, qui forme l'atmosphère solaire, est l'objet de nombreuses observations et hypothèses dès le début du XVII^{ème} siècle, avec la découverte par Galilée et quelques autres des taches solaires et de la rotation du soleil sur lui-même, qui remet fortement en question la doctrine aristotélicienne. Descartes bâtit à partir de cette observation une théorie de l'atmosphère du soleil, par extension des connaissances de l'époque sur l'atmosphère terrestre, qui va dominer le paysage en la matière pendant un siècle. La prise de conscience, dès le XVI^{ème} siècle, du fait que la queue des comètes se déploie toujours dans la direction opposée au soleil, qui semble montrer que l'origine de la queue est dans le soleil, puis les parallèles faits par certains savants dès le début du siècle suivant entre taches solaires et comètes, font naître chez certains l'idée que les comètes pourraient être engendrées par le soleil, ou tout au moins être riches en matière solaire, idée que l'observation de la grande comète de 1680, qui est passée très près du soleil, renforce considérablement. La découverte de la lumière zodiacale par Jean-Dominique Cassini en 1683, celle-ci étant aussitôt interprétée comme la marque de l'atmosphère du soleil, pouvant s'étendre jusqu'au-delà de l'orbite terrestre, constitue le dernier volet, au XVII^{ème} siècle, de la construction de la représentation d'un soleil entouré d'une atmosphère active dans de nombreux compartiments de l'espace planétaire. Les aurores boréales refont par ailleurs leur apparition, après un siècle de faible activité solaire, et celles-ci, très spectaculaires et observées depuis de nombreux points du globe, sont reliées par certains savants, comme Hartsoeker, à la sphère solaire à travers des théories globalisantes intégrant l'ensemble des manifestations supposées d'origine solaire. C'est dans ce contexte qu'émerge au début du XVIII^{ème} siècle la théorie des aurores boréales de Jean-Jacques Dortous de Mairan, à laquelle nous nous intéressons, notamment sous l'angle des valeurs qu'impliquent les observations d'aurores pour la hauteur de l'atmosphère de la Terre. Le système de Mairan, un monument du genre, s'inscrit dans le cadre conceptuel foisonnant issu du XVII^{ème} siècle que nous venons de décrire, et c'est à poser ce cadre que nous nous employons dans la partie 2. Dans la partie 3, nous détaillons la théorie développée par Mairan, concurrencée par celle de Halley (cf chap. 4), puis par celle de Euler (cf chap. 8), et l'inscrivons notamment dans les courants de pensée de l'époque, sans toutefois que l'empreinte du cartésianisme se révèle directement déterminante. La pensée cartésienne incite néanmoins, comme nous l'avons

mentionné précédemment, les astronomes de l'Académie des Science à augmenter considérablement leur estimation de la hauteur de l'atmosphère au début du XVIII^{ème} siècle, en rupture avec les estimations basées sur la seule réfraction faites par Kepler et Cassini au siècle précédent, et, de ce point de vue, le système de Mairan, qui autorise une atmosphère de grande hauteur, résonne à l'unisson du postulat cartésien d'une atmosphère de grande hauteur, permettant de réconcilier la théorie des tourbillons et les lois de Kepler. Nous traitons également dans la partie 3 la question de l'impact potentiel de l'existence d'une atmosphère solaire sur la détermination de la hauteur de l'atmosphère par la méthode des crépuscules, ainsi que l'avait suggéré Kepler, qui pensait, sur la base de la réfraction de la lumière des étoiles, que l'atmosphère n'a que quelques kilomètres de hauteur, et la façon dont La Hire réagit aux suggestions de Kepler.

2. État des connaissances sur le soleil au XVII^{ème} siècle

2.1 Taches solaires et rotation du soleil sur son axe

On peut lire à l'entrée TACHES du Dictionnaire Universel (1690) la description suivante des taches solaires :

On a découvert aussi des taches dans le soleil [...] Les taches qui l'obscurcissent paraissent en forme de nuage, ou de fumée, & il semble qu'elles flottent sur la superficie du soleil. Par le moyen des lunettes d'approche on a remarqué un grand nombre de taches, sur le corps du soleil. On n'en connaît pas bien encore la nature. Plusieurs croient que ce sont des astres. Mais il y a bien plus d'apparence que ce sont des corps opaques, en manière de croûtes, semblables à l'écume qui se forme sur la surface des liqueurs.

Plusieurs astronomes ont observé de manière systématique les taches solaires à partir de 1610. L'astronome allemand Johannes Fabricius, dont le père correspond régulièrement avec Johannes Kepler et Tycho Brahé, est l'un des premiers à les observer directement à l'œil grâce à l'effet filtrant de brumes sur l'horizon fin 1610 (Dame, 1966). Lui et son père observent ensuite les taches en projetant l'image du soleil collectée par une petite ouverture sur un carton blanc, et Fabricius publie ces observations dans son *Discours sur les taches solaires et leur apparente rotation avec le soleil* daté de juin 1611, paru à l'automne de la même année. Cette publication précède celle de Galilée, qui est de 1613, même s'il semble que Galilée ait observé

les taches à la lunette à Padoue dès l'été 1610. Ainsi que le rapporte François Arago (1855), Kepler faisait remonter à l'antiquité l'observation des taches. Des taches ont été observées au cours du premier millénaire en Chine et au Pérou, par exemple, ainsi que dans les mondes romains, arabes et indiens. Galilée rapporte qu'une tache noire vue en l'an 807 pendant huit jours a été attribuée à la planète Mercure. Kepler lui-même, en 1607, a observé une tache qu'il a prise pour Mercure. Les raisons de cette résistance à la reconnaissance du caractère proprement solaire des taches, en dépit de l'évidence fournie par l'observation, sont à rechercher dans la doctrine aristotélicienne de l'incorruptibilité des cieux, la plupart des astronomes préférant interpréter ces taches comme des corps célestes extérieurs passant devant le soleil, comètes ou planètes.

Plusieurs astronomes, dont Galilée en Italie, Christoph Scheiner et Fabricius en Allemagne, et Thomas Harriott en Angleterre, observent les taches quasiment en même temps à partir de 1610 (Dame, 1966). Galilée est incontestablement le plus hardi, écrivant dans une correspondance datée de 1612 :

Quant à ces taches, je conclus finalement et je crois pouvoir montrer nécessairement qu'elles sont contiguës à la surface du corps solaire où elles s'engendrent et se dissolvent continuellement à la manière justement des nuages autour de la Terre ; qu'elles sont portées par le Soleil dans le tour qu'il fait sur lui-même en un mois lunaire, avec une révolution semblable à celles des planètes, c'est-à-dire du Couchant au Levant autour des pôles de l'écliptique. Je présume que cette nouveauté doive être l'enterrement ou plutôt le suprême et dernier jugement de la pseudo-philosophie, dont on a déjà vu des signes dans les étoiles, la Lune et le Soleil ; et je m'attends à entendre de grandes choses des péripaticiens pour le maintien de l'immutabilité des cieux, laquelle je ne sais où elle pourra être sauvée et cachée, puisque le Soleil lui-même nous le montre dans des expériences très évidentes.

Fabricius pense, comme Galilée, que les taches sont adhérentes au corps solaire, qu'elles ne sont donc ni des nuages, ni des comètes, puisque leur mouvement, bien que fluctuant, n'est en rien erratique (opinion que beaucoup après lui, tels Cassini, partageront), et, de ce mouvement globalement cohérent, il déduit, comme Galilée, la rotation du soleil sur lui-même. Scheiner, qui publie ses travaux en 1612, affirme au contraire que les taches ne sont pas sur le soleil, et qu'elles sont des étoiles tournant autour de lui. Scheiner ne rejoindra le point de vue de Galilée sur le caractère solaire des taches et sa rotation sur son axe que plus tard, après de nombreuses observations consignées dans son traité *La Rosa Ursina* de 1630, dans lequel il décrit les variations des trajectoires des taches en fonction de la saison d'observation, qui résultent

d'effets géométriques liés à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestres sur le plan de l'écliptique et à celle de l'axe des pôles solaires (estimée de 7°). Selon Malherbe (2016), « *Christoph Scheiner serait le premier astronome à avoir utilisé une monture équatoriale, permettant de suivre le mouvement des astres en n'agissant que sur un mouvement de rotation de l'appareil dans le sens contraire de celui de la Terre* ». La rotation du soleil sur lui-même, tout comme celle de la Terre, subvertit la doctrine péripatéticienne. Elle a déjà été évoquée au XVI^{ème} siècle par Giordano Bruno, qui connaissait l'existence des taches, tout comme son illustre prédécesseur Nicolas de Cues au XV^{ème} siècle, et Kepler lui-même. Mais ce n'est pas en s'appuyant sur l'existence des taches que Kepler fit cette prédiction. Dans son ouvrage *De Stella Martis* paru en 1609, Kepler attribue la cause de la rotation des planètes autour du soleil à la rotation du soleil sur son axe, mais il fait tourner le soleil sur lui-même en trois jours, à partir d'une analogie avec le système Terre-lune. Jérôme de La Lande (1764) dit à ce sujet :

Kepler en cherchant la cause du mouvement des planètes dans la rotation du soleil, pensa d'abord que c'était dans le plan de l'écliptique où elle devait s'achever, en sorte que les pôles du soleil & les pôles de l'écliptique répondissent aux mêmes points du ciel.

[...] il crut aussi que le soleil devait tourner en trois jours, c'est-à-dire, 30 fois plus vite que Mercure, parce que la terre tourne sur son axe 30 fois plus vite que la lune. Dans la suite, & après la découverte des taches, & de la véritable inclinaison de l'axe du soleil, Kepler fut obligé de reconnaître que la direction & la vitesse de la rotation du soleil étaient fort différentes ; mais il se servit de l'obliquité même de ce mouvement pour expliquer le déplacement de l'écliptique & le changement de latitude des étoiles fixes.

Quant à Fabricius, il ne manque pas de faire le rapprochement entre le mouvement de rotation du soleil impliqué par le déplacement des taches et les conceptions de Kepler, même si les périodes de rotation diffèrent considérablement, quand il écrit, suivant la traduction de La Lande (Plana, 1863) :

Nous invitons les amateurs des vérités physiques à profiter de l'ébauche que nous leur présentons. Ils soupçonneront sans doute que le Soleil a un mouvement de conversion, comme l'a dit Jordano BRUNO (c'est celui qui fut brûlé en 1600, comme convaincu d'athéisme ou d'irréligion), et, en dernier lieu, KEPLER dans son livre sur les mouvements de Mars [1609]; car, sans cela, je ne sais ce que nous ferions de ces taches.

Au début des années 1620, Pierre Gassendi, en France, observe également les taches solaires, et se rallie rapidement à l'interprétation de Galilée, avec qui il correspond à partir de 1625 (Taussig, 2016). En 1631, il observe le passage de Mercure devant le soleil, annoncé deux ans à l'avance par Kepler sur la base de sa loi des aires, montrant d'une part la petitesse de la planète, remettant en question l'impression subjective de taille basée sur la seule perception de la luminosité, et prouvant d'autre part la validité de l'hypothèse de Kepler. Gassendi correspond également avec Scheiner, et ses lettres révèlent une approche entièrement nouvelle, d'une « *scientificité pure* », écrit Taussig, sans aucune métaphore ni hypothèse. Taussig écrit encore, parlant de la conception de Gassendi :

Le Soleil est une réalité cosmologique, et rien d'autre, c'est-à-dire ni la métaphore d'un Dieu souverain (ou d'un pouvoir humain qui en serait le délégué), ni une métaphore du Bien ou du Vrai, ni l'objet suprême d'un univers mathématiquement parfait et explicable selon un modèle pythagoricien, mathématique : une réalité qu'il est possible d'étudier, dont l'observation permet de mieux comprendre le cosmos, voire de démonter le vieux cosmos géocentrique et d'en construire un nouveau, ce qu'il faut entendre derrière son adhésion à la théorie galiléenne des taches.

On peut considérer qu'à partir des années 1630, il existe un certain consensus sur l'existence des taches solaires comme des objets issus du soleil et localisés à sa surface, traçant la rotation du soleil sur lui-même en 27 jours autour d'un axe incliné de 7° sur le plan de l'écliptique. Par ailleurs, Galilée a découvert des taches brillantes, qu'il a dénommées facules.

Descartes s'empare de cette découverte pour élaborer une théorie de l'atmosphère solaire inspirée de sa vision de l'atmosphère de la Terre. Dans les Principes (1631), il théorise sur la matière du soleil, qu'il suppose composée de particules de « grosseurs » diverses, depuis les plus subtiles, dont est composée la matière du Premier Élément (le feu), jusqu'aux parties Cannelées du second Élément (l'air), en passant par des particules de grosseur intermédiaire. Il postule un mouvement très rapide et collectif dans le corps du soleil des particules les plus subtiles, donc de la matière du feu, rejetant hors du corps principal du soleil les particules plus grosses « *qui à cause de l'irrégularité de leurs figures ne peuvent recevoir un mouvement si prompt* ». Ces parties, « *s'attachant facilement les unes aux autres, [...] nagent sur [la] superficie [du soleil], où perdant la forme du premier Élément, elles acquièrent celle du Troisième [la Terre], et lorsqu'elles y sont en fort grande quantité, elles y empêchent l'action de sa Lumière; & ainsi composent des taches, semblables à celles qu'on a observées sur le*

Soleil ». Descartes compare la matière des taches à celle de l'écume qui se forme à la surface des liqueurs qu'on fait bouillir sur le feu, lorsque ces liqueurs ne sont pas pures, c'est-à-dire « *qu'elles ont des parties qui ne pouvant être agitées par l'action du feu si fort que les autres, s'en séparent, & s'attachant facilement ensemble, composent cette écume* ». Pour Descartes, les taches se meuvent autour du soleil, pas nécessairement aussi vite que la matière qui le compose, mais au moins conjointement avec le tourbillon qui le meut. Il complète le cycle de la matière solaire en supposant que les taches finissent par se désagréger dans le courant sous-jacent violent de la matière « *purifiée et subtilisée* » du premier Élément, qui « *ainsi en défait ou dissout à peu près autant qu'il s'en produit de nouvelles* ». Pour lui, toute la surface du soleil est composée d'un mélange des matières des second et troisième Éléments, cette matière ne prenant « *le nom de taches, qu'aux endroits où elle est si épaisse, qu'elle obscurcit notablement la lumière qui vient de lui vers nos yeux* ».

Descartes fait ensuite l'analogie entre l'atmosphère solaire et l'atmosphère de la Terre. Il écrit, en parlant des taches :

Et se joignant les unes aux autres sans aucunement se presser, elles composent un corps fort rare, semblable à l'air qui est autour de la Terre, au moins à celui qui est le plus pur au-dessus des nues. Et ce corps rare, que j'appellerai Air dorénavant, environne le Soleil de tous côtés, s'étendant depuis sa superficie jusques vers la Sphère de Mercure, & peut-être même plus loin. Mais encore qu'il reçoive sans cesse de nouvelles parties, de la matière des taches qui se défont, il ne peut pas pour cela croître à l'infini; parce que l'agitation du second Élément qui passe tout autour & tout au travers de son corps, dissipe autant de ses parties qu'il lui en vient de nouvelles, & les divisant en plusieurs pièces, leur fait reprendre la forme du premier Élément. Mais pendant qu'elles composent cet air, ou ces taches, soit autour du Soleil, soit autour des autres Astres (lesquels sont en ceci tous semblables) elles ont la forme que j'attribue au Troisième Élément, à cause qu'elles sont plus grosses & moins propres à se mouvoir que les parties des deux Premiers.

C'est ainsi une théorie des atmosphères des astres en général qu'élabore Descartes, qui se base sur l'observation des taches pour étendre sa conception de l'atmosphère terrestre au soleil, et à tout autre corps planétaire. Il existe des variantes de cette vision, comme par exemple la conception plus statique, au sens qu'elle ne fait pas appel à une notion de cycle (agglomération-dissolution des taches), de la Hire, citée par Jean-Sylvain Bailly (1785) :

Selon lui [la Hire], les taches obscures, & quelquefois tout-à-fait noires, appartiennent à une masse solide, dont elles ne font que les éminences. Cette masse est de toutes parts enveloppée, baignée, brûlée par le fluide du feu & de la lumière : la masse nage dans le fluide, & lorsqu'elle s'élève, elle montre ses éminences que nous prenons pour des taches; lorsque la masse s'enfonce, les taches & les éminences disparaissent. La tache est noire, lorsque l'éminence est entièrement dépouillée du fluide igné ; elle n'est qu'obscur, lorsque l'éminence est recouverte d'une couche légère & transparente. Enfin les taches, avant de se montrer, & après avoir disparu, laissent cette apparence désignée sous le nom d'ombre, & qui n'est que l'opacité de la masse solide aperçue à travers une couche plus épaisse du fluide.

En moins d'un demi-siècle (première moitié du XVII^{ème} siècle), on passe ainsi de la vision aristotélicienne du soleil, globe de feu pur, à celui d'une corps physique en perpétuelle évolution, secrétant son atmosphère et la recyclant en son sein. Bien sûr, la nature du matériau constituant les taches reste inconnue. On peut lire par exemple à l'entrée TACHES de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert que les taches « *naissent & disparaissent au-milieu du disque, & qu'elles subissent diverses altérations, eu égard à leur grandeur, à leur figure & à leurs densités ; on peut conclure delà qu'elle se forment & se dissolvent ensuite fort près du soleil, & que ce sont très-probablement des espèces de nuages solaires formés des exhalaisons du soleil* », ce qui montre à quel point le statut physique des taches (écume, croûtes, nuages, ...) reste encore incertain un siècle après Descartes. Bien des mystères entourent ces taches, auxquelles certains attribuent la capacité de couvrir entièrement le soleil et de le rendre obscur, rendant compte de son assombrissement à certaines époques (Kepler), ou d'expliquer l'apparition de nouvelles étoiles, qui seraient demeurées masquées longtemps par leurs taches (Descartes). Mais le plus important pour notre sujet est la représentation générale de l'atmosphère solaire qui s'est forgée au XVII^{ème} siècle, résumée ainsi dans l'article de l'Encyclopédie :

Puis donc que les exhalaisons du soleil s'élèvent de son corps, & se tiennent suspendues à une certaine hauteur de cet astre, il s'ensuit delà, selon les lois de l'hydrostatique, que le soleil doit être entouré de quelque fluide qui puisse porter ces exhalaisons vers en haut, fluide qui comme notre atmosphère doit être plus dense vers le bas, & plus rare vers le haut ; & puisque les taches se dissolvent & disparaissent au milieu même du disque, il faut que la matière qui les compose, c'est-à-dire, que les exhalaisons solaires retombent en cet endroit ; d'où il suit que c'est dans cet endroit que doivent naître les changements de l'atmosphère du soleil, & par conséquent du soleil lui-même.

Au seuil de la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle, de nouveaux objets physiques apparaissent dans le paysage de l'étude du soleil et de l'atmosphère solaire, à savoir les comètes. Celles-ci ont perdu depuis près d'un siècle leur statut de météores avec l'observation non ambiguë par Tycho Brahé d'une distance de la comète de 1577 très supérieure à celle de la lune, les faisant sortir, du moins aux yeux de certains astronomes, du monde sublunaire. Mais c'est Peter Apian, remarquant au milieu du XVI^{ème} siècle que les queues des comètes sont orientées dans la direction opposée au soleil, qui va le premier introduire un lien entre l'origine de la queue des comètes et le soleil, préfigurant les travaux ultérieurs de Mairan, ou de Euler.

2.2 Nature et origine des comètes et de leurs queues

Dans le monde pré-aristotélicien, les comètes sont considérées comme résultant de la rencontre fortuite de petites étoiles se regroupant et devenant pour un temps un amas visible, avant de se séparer et retourner à l'état d'étoiles individuelles. Aristote a réfuté ces hypothèses et avancé (cf entrée COMÈTES de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert) que :

Les comètes sont des feux passagers, ou des météores composés d'exhalaisons élevées au-dessus de la région de l'air dans le lieu où, suivant lui, est le feu ; & il regardait dans cette hypothèse les comètes comme beaucoup au-dessous de la lune.

Sénèque s'oppose dès le premier siècle au postulat du caractère éphémère des comètes :

Je ne suis pas, dit-il, de l'opinion commune sur les comètes ; je ne les regarde pas comme des feux passagers, mais comme des ouvrages éternels de la nature. Chaque comète a un certain espace assigné à parcourir. Les comètes ne sont point détruites, mais elles se trouvent bientôt hors de la portée de notre vue.

Il faut attendre l'observation par Tycho Brahé de la comète de 1577, dont l'absence de parallaxe sensible entre Uraniborg, en Suède, et Prague, lieux distants de 600 km, prouve qu'elle se situe bien au-delà de l'orbite de la lune, pour que le dogme de l'incorruptibilité des cieux soit battu en brèche. Les comètes sortent ainsi de la catégorie des météores, cette idée ne s'imposant cependant unanimement qu'à la fin du siècle suivant. La Lande (1792) note que « Riccioli, en 1651, après de longues dissertations, jugeait qu'on n'avait véritablement démontré pour aucune comète qu'elle fût au-dessus de la Lune, et qu'il était peu probable que ce fussent d'anciennes

planètes ». Vers la même époque, le jeune Jean-Dominique Cassini, partage la conviction que les comètes sont des amas de vapeur éphémères, ainsi qu'il l'écrit vingt ans plus tard, pour la critiquer (1681) :

[...] nous pouvons supposer que la Comète ne cesse pas d'être dans le Ciel quand nous ne la pouvons plus distinguer, & qu'elle y était avant qu'elle nous fut visible. De même aussi que nous ne saurions assigner un temps auquel elle cesse d'être ; nous ne saurions non plus lui assigner un commencement ; & nous avons bien plutôt fait de supposer qu'elle a toujours été, que d'expliquer comment elle aurait commencé. Car quand on suppose que les Comètes sont formées des exhalaisons des autres astres, comme j'ai fait autrefois avec bon nombre d'astronomes, on ne saurait expliquer comment elles s'unissent dans un même lieu, pour former une si grande masse, & pour recevoir une si grande impression de mouvement ; laquelle difficulté n'est plus particulière aux Comètes, si nous les supposons être une espèce de Planète, dont le mouvement est fort excentrique à la Terre.

Concernant l'orbite de la comète de 1577, Tycho Brahé observe qu'il s'agit d'un arc-de-cercle, mais Kepler pense à propos de la comète de 1618 qu'elle suit une ligne droite, Riccioli hésitant entre les deux alternatives pour la comète de 1651. Dans son traité de 1664, Cassini estime que les comètes suivent un cercle très excentrique autour de la Terre, opinion qu'il défendra toute sa vie, même après les travaux de Newton et de Halley établissant le caractère keplerien des orbites cométaires autour du soleil. La Lande attribue à l'astronome polonais Johannes Hévélius la paternité de l'idée, exprimée dans sa Cométographie (1668), que la trajectoire de la comète peut être assimilée à un arc de parabole, idée publiée par Doerfel en 1681. Par ailleurs, Hévélius affirme dans sa Cométographie que la route des comètes est courbée vers le soleil, en comparant la comète subissant l'attraction du soleil à un projectile lancé au-dessus de la Terre et soumis à son attraction, et que la vitesse de la comète est maximale au sommet de la parabole. C'est Newton qui, analysant la trajectoire de la grande comète de 1680, montre définitivement qu'elle suit une portion d'ellipse très allongée autour du soleil, et que son mouvement respecte la loi des aires de Kepler. A côté de cette idée juste, bien que formulée à demis mots, sur la trajectoire des comètes, Hévélius développe une conception de la formation du noyau cométaire par accréation de vapeurs, certes inexacte mais intéressante pour notre sujet. Alexandre Guy Pingré (1783) énonce ainsi cette conception qui vise notamment, de par le caractère hétérogène qu'elle confère au noyau cométaire, à expliquer les variations brutales de luminosité et de dimension de certaines queues cométaires :

Les Comètes sont dans l'éther, & non point dans cet air crasse que nous respirons : elles doivent donc être formées d'une matière éthérée. La Lune, le Soleil, les Planètes, les Étoiles même ont probablement une atmosphère analogue à celle de la Terre. Par leur propriété essentielle, les Planètes, pour purger leurs corps, rejettent continuellement dans leur atmosphère les exhalaisons qui pourraient leur nuire. Les plus crasses d'entre ces exhalaisons s'écartent peu du corps de la Planète qui les a produites ; elles forment nos nuages & les taches du Soleil : elles se dissolvent ensuite, & retournent à la source qui les avait formées. Les plus subtiles ne diffèrent de ces premières, qu'en tant qu'elles peuvent s'élever plus haut, atteindre la surface extérieure de l'atmosphère, & aller même au-delà. Alors il peut arriver que cette matière s'atténue ; mais ses parties les plus grasses & les plus tenaces peuvent aussi s'épaissir & s'unir, de manière que plusieurs exhalaisons, plusieurs nuages célestes se condensent en une seule nuée plus solide, en un seul corps, en un seul noyau. Car cette matière, ainsi que nos vapeurs terrestres, par une faculté naturelle & innée, a une inclination marquée à se condenser. Il surviendra d'autres nuages, d'autres corps, d'autres noyaux des atmosphères voisines, qui se joindront aux premières. Le tout formera une masse surprenante, parviendra peu-à-peu à sa maturité, acquerra une solidité capable de réfléchir les rayons du Soleil; & voilà ce que nous appellerons une Comète.

Et c'est au fait que le soleil attire à lui ses exhalaisons passées, disséminées dans l'espace interplanétaire, puis concentrées dans les noyaux cométaires, que Hévélius attribue la décroissance de la queue de la comète dans la sphère solaire après son passage au plus près de l'astre :

Par cette raison, la Comète peut être composée de différents noyaux. Lorsqu'elle approche du Soleil, elle reçoit ordinairement les plus grands accroissements, parce que les évaporations du Soleil tendent fort à la condensation, & cimentent en quelque sorte celles qui sont émanées des Planètes. Mais le Soleil, comme tous les corps célestes, n'expire pas seulement ses exhalaisons, il les attire aussi, il les fait revenir en temps convenable : c'est pour cela que la Comète commence à décroître dans la sphère même du Soleil.

Et encore, à l'entrée COMÈTES de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert :

Hévélius qui a fait un grand nombre d'observations sur les comètes, prétend qu'elles sortent du soleil, que ce sont les exhalaisons les plus grossières que produit cet astre, & qu'elles sont de même nature que les taches du soleil.

Ce point de vue de Hévélius, un acteur important de l'observation des comètes au XVII^{ème} siècle, va jouer un rôle significatif dans le développement de la vision des connexions soleil-comète dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle, et suite à l'apparition de la comète de 1680,

qui passe très près du soleil, elle sera reprise par Hartsoeker (1694) au sein d'une vision globale unificatrice.

Un résultat essentiel de Newton relativement à la comète de 1680, qui est passée très près du soleil (moins d'un million de kilomètres), est précisément qu'elle exclut définitivement l'hypothèse de l'amas de vapeurs, encore très présente au milieu du XVII^{ème} siècle, et dont on vient de voir qu'elle est défendue par Hévélius. Newton calcule, en appliquant la loi en $1/r^2$, que la chaleur provoquée par le soleil est 28000 plus intense qu'elle ne l'est au niveau de la Terre, ce qui représente 2000 fois la chaleur de fusion du fer (Entrée COMETS du Lexicon, 1704). Si la comète était un amas de vapeurs et d'exhalaisons, son passage si près du soleil l'aurait entièrement dissoute et rendue invisible, ce qui ne s'est pas produit et prouve que les comètes sont des corps compacts, solides, durables comme ceux des planètes.

D'après Mairan (1747) et La Lande (1792), c'est l'astronome et mathématicien allemand Peter Apian qui le premier, au milieu du XVI^{ème} siècle, à partir de l'observation de cinq comètes qui parurent entre 1530 et 1540, remarqua que les queues des comètes étaient toujours tournées du côté opposé au soleil, ce dont il conclut que les queues des comètes tiraient leur origine du soleil. La première explication qu'en donne Kepler dans son *Astronomie Optique* de 1604 est de nature optique, à savoir que le corps transparent de la comète réfracterait les rayons du soleil qui le traversent, et la figure au foyer des rayons réfractés se projetant sur l'éther dessinerait la queue. Mais cette capacité prêtée à l'éther de réfléchir les rayons du soleil devrait impliquer que l'on reçoive autant de lumière la nuit que le jour, ce qui n'est manifestement pas le cas. En conséquence, écrit Mairan : « Kepler ... substitua donc [à sa première explication] une matière subtile qu'il croyait que les rayons du Soleil entraînaient ou arrachaient de la Comète. C'est ainsi qu'il concevait encore, que la Comète, après avoir passé par son Périhélie, allait toujours en diminuant de substance & d'apparence, comme il le dit dans le second de ses trois livres sur les Comètes, publiés en 1619 ». Dès 1622, la conception de Kepler était clairement comprise et exprimée dans le monde savant de l'époque :

Deux choses, disait Longomontanus, concourent à la formation de la chevelure ou de la queue d'une Comète; les rayons solaires, & la matière qui environne la Comète : car ces rayons venant à agir puissamment contre cette matière, depuis sa superficie jusqu'à la surface de la Comète, en chassent avec impétuosité les parties les plus légères, & les entraînent bien loin au-delà du corps de la Comète à l'opposite du Soleil.

Newton, comme Kepler, rejette l'explication réfractive. Il réfute aussi un deuxième type d'hypothèse, selon laquelle la queue serait le pinceau lumineux tracé par les rayons du soleil passant à travers la tête de la comète, comme un faisceau de lumière tombant dans l'obscurité à travers un interstice ou un trou. Dans ce cas, c'est pour Newton la présence de particules de fumée ou de poussières dans le faisceau qui explique la diffusion de la lumière, puisque le phénomène ne se produit pas dans l'air pur, et l'absence, ou la très petite quantité, de matière dans la région céleste, fait que ce phénomène ne peut pas s'y produire. On trouve à l'entrée COMETS du Lexicon (1704), le résumé suivant de l'explication proposée par Newton, basée sur l'idée que la matière cométaire chauffée par le soleil s'élève vers le « haut », donc dans la direction opposée au soleil :

Il observe également que les queues de toutes les comètes sont les plus longues et les plus grandes après leur séparation du soleil, ou juste après leurs périhélies ; ce qui montre que la chaleur du soleil contribue à l'augmentation de la queue, d'où il est plus que probable que la queue d'une comète n'est qu'une longue et très fine fumée, ou train de vapeurs, que le noyau enflammé, ou la tête de la comète, émet à partir de celle-ci. Et cette notion, il la confirme par la suite, en réfutant les deux autres opinions existantes sur l'origine de la queue d'une comète.

Newton explique naturellement, dans cette hypothèse, l'orientation des queues des comètes et leur concavité :

Car comme dans l'air, la fumée de tout corps qui brûle monte verticalement si le corps est au repos, mais obliquement s'il présente un mouvement latéral ; ainsi dans les cieux, où les corps gravitent vers le soleil, la fumée et les vapeurs doivent monter du soleil, et cela, en ligne droite, si le corps qui fume est au repos : ou obliquement, s'il se déplace latéralement, et, par son mouvement progressif, quitte en permanence les espaces d'où les parties supérieures des vapeurs sont montées ; et cette obliquité sera moindre là où l'ascension des vapeurs est plus rapide, c'est-à-dire près du soleil, et près du corps qui fume.

Pour l'auteur de l'article du Lexicon, les particules de la queue sont agitées et chauffées par la réflexion et la réfraction des rayons du soleil, et chauffent par contact les particules de l'éther avec lesquelles elles sont mélangées. L'éther chauffé est ainsi raréfié et sa gravité spécifique diminuée d'autant, en sorte qu'il va s'élever au sein de l'éther environnant plus pesant, emportant avec lui les particules de la queue auxquelles il est mêlé. Cette précision est

importante, puisque la fumée qui s'échappe de la cheminée ne s'élève que par la diminution relativement au milieu ambiant de sa gravité spécifique, et qu'un tel mécanisme ne peut s'appliquer à de la matière évoluant dans le vide. On trouve d'ailleurs une objection au mécanisme de Newton portant précisément sur cet aspect dans l'Essai sur les Comètes d'André Oliver (1777). L'explication de Newton diffère de celle de Kepler, le premier attribuant la queue à un mécanisme de chauffage par le soleil, le second à une force d'éjection exercée par les rayons du soleil sur la matière de la queue cométaire. De façon intéressante, la précision apportée par l'auteur de l'article du Lexicon rapproche les deux explications puisqu'elle médiatise l'effet de chauffage par l'action des rayons solaires. Euler, dans son explication des aurores boréales (1746), reprend l'explication de Kepler. Mairan (1733), sur le même sujet, l'utilise également, mais suppose qu'elle s'applique à une matière éthérée captée par les comètes au sein de l'atmosphère solaire.

Un personnage très important de la première moitié du XVII^{ème} siècle est Pierre Gassendi. Au-delà de sa conception atomiste, et de son soutien aux idées scientifiques les plus progressistes de son temps, il est celui qui s'est le plus engagé contre les idées superstitieuses relatives aux apparitions de comètes, considérées comme de mauvais augure. Pingré dit de lui dans sa Cométographie de 1783 :

Mais le plus grand service que Gassendi a rendu à l'Astronomie cométaire, a été de la dégager des vaines superstitions, des ridicules visions de l'Astrologie & de la Cométomantie. Avant lui, les plus grands esprits n'avaient pu se garantir de la contagion; Régiomontan, Appien, Cardan, Tycho, Mestlin, Képler, Longomontan, avoient été Astrologues ou du moins Cométomantiens. Depuis Gassendi, à peine trouve-t-on quelques vestiges de cette illusion; du moins il ne faut pas les chercher dans les Écrits des grands Hommes dont il nous reste à parler: l'erreur était ancienne, invétérée, générale; Gassendi la terrassa par des raisonnements bien simples.

Pingré rapporte les propos suivants de Gassendi :

Pourquoi regardons-nous donc les Comètes comme cruelles, funestes, terribles, plutôt que de les appeler douces, bienfaisantes, aimables? Oui, les Comètes sont réellement effrayantes, mais par notre sottise: nous nous forgeons gratuitement des objets de terreur panique; & non contents de nos maux réels, nous en accumulons d'imaginaires.

S'opposant pareillement à la pensée superstitieuse, Newton théoriserait un peu plus tard l'effet bénéfique des comètes sur notre environnement. Remarquant que l'humidité absorbée par la végétation et les putréfactions retourne à la Terre sèche, il invoquera les comètes comme nécessaire source régénératrice de vapeurs. On trouve à l'entrée COMETS du Lexicon le propos suivant :

De là, la quantité ou le volume de terre sèche devrait continuellement augmenter, et les liqueurs ou l'humidité de notre globe continuellement diminuer, et enfin s'évaporer et se perdre, s'ils ne nous étaient pas continuellement fournis par une partie ou une autre de l'univers. Et je soupçonne également (dit notre auteur [Newton]) que l'Esprit, qui est la partie la plus fine, la plus subtile et la meilleure de notre air, et qui est nécessaire à la vie et à l'être de toutes choses, vient principalement des comètes.

L'observation de la grande comète de 1680 génère un grand nombre de nouvelles conceptions (Pingré, Cométographie, Cf chap. X, 1783). Certains cartésiens proposent qu'une comète naît de deux tourbillons de planètes voisines qui s'entrechoquent, formant au centre un troisième tourbillon. D'autres suggèrent que les comètes sont des planètes d'étoiles fixes. Hartsoeker propose que la comète de 1680 aient été créée de toute pièce à partir des évaporations du soleil. Pour Bernoulli, les comètes sont les satellites d'une planète invisible 250 fois plus éloignée du soleil que la Terre.

Mais l'opinion la plus extravagante de toutes, fut celle de Jean-Charles Gallet, Prévôt de l'église de Saint-Symphorien d'Avignon, Astronome d'ailleurs assez recommandable ; il prétendit qu'une seule & même Étoile, tournant autour du Soleil, était souvent invisible, & qu'elle se rendait quelquefois visible, tantôt sous la forme d'une tache & tantôt sous celle d'une Comète : telle était selon lui l'origine des Comètes & des taches du Soleil.

Par ailleurs, les comètes posent un sérieux problème aux tenants du système cartésien des tourbillons, qui n'autorise pas les trajectoires des planètes à se croiser. Fontenelle, cartésien convaincu, écrit (1708) :

On se délivrerait tout d'un coup, dit-il, de tous les embarras qui peuvent naître de toutes ces directions de mouvements, en supprimant, comme a fait un des plus grand génies de ce siècle [Newton], toute cette matière fluide immense que l'on imagine communément entre les Planètes, & en les concevant suspendues dans un vide parfait ; mais ce moyen de lever une difficulté pourrait en avoir lui-même de très grandes, Il nous suffit présentement d'avoir fait sentir une partie de celles qu'on aura à vaincre

dans un système Physique des Comètes : c'est en quelque sorte annoncer par avance la gloire de ceux qui l'entreprendront.

De fait, de nombreuses hypothèses seront faites pour concilier cartésianisme et existence des comètes, comme par exemple celle proposée par Mairan, ainsi décrite par Pingré :

Jean-Jacques Dortous de Mairan imagina, en 1725, que le tourbillon du Soleil pouvait être extrêmement aplati & comme disciforme : alors les Comètes pourraient être des Planètes d'un tourbillon voisin ; elles s'approcheraient fort près de nous, & s'éloigneraient encore plus, sans rencontrer aucun obstacle. L'hypothèse était ingénieuse : mais l'observation démontra que les Comètes traversaient l'écliptique, & par conséquent ce prétendu tourbillon disciforme.

Au tableau déjà complexe du soleil et de son atmosphère, et des comètes qui lui apparaissent liées, tant au plan de l'observation (directions des queues cométaires opposées au soleil) que des représentations (participation de l'atmosphère solaire à la matière des queues cométaires selon de nombreux savants), vient s'ajouter au début des années 1680 la lumière zodiacale, dont la découverte par Cassini vient confirmer, de l'avis général de l'époque, l'existence d'une atmosphère solaire s'étendant loin de son astre, au-delà de l'orbite de Vénus, voire de celle de la Terre. La similarité de transparence entre lumière zodiacale et queue des comètes resserre encore le lien entre les différentes pièces de l'édifice, annonçant la théorie des aurores boréales que Mairan développera au début du XVIII^{ème} siècle.

2.3 Lumière zodiacale et atmosphère solaire

C'est ainsi que Cassini décrit dans son *Recueil d'observations faites en plusieurs voyages par ordre de sa Majesté pour perfectionner l'astronomie et la géographie* (1693) sa découverte de la lumière zodiacale en 1683 :

Le Ciel en cet endroit était fort clair, de sorte qu'on y pouvait distinguer à la simple vue les étoiles de la sixième & de la septième grandeur ; & cette clarté, quoique ressemblante à un brouillard éclairé du Soleil, n'empêchait pas qu'on ne vit ces petites étoiles, même dans le milieu où elle semblait plus dense, comme on les voit ordinairement à travers les queues des comètes. Mais sa largeur était trop grande pour pouvoir passer pour la queue d'une comète, excédant trois ou quatre fois la largeur des plus grandes que j'ai vues jusques à présent. Au reste elle leur était semblable, non seulement dans la

transparence, mais aussi dans la couleur, & dans la situation à l'égard du Soleil, auquel elle était à peu près dirigée selon sa longueur.

On s'aperçut en peu de temps qu'elle suivait aussi le mouvement du Ciel vers l'Occident : car dans ce mouvement elle demeurait toujours dans les mêmes constellations, & se plongeait avec elles dans les brouillards qui étaient sur l'horizon.

Cette lumière, qui apparaît environ une heure après le coucher du soleil, est extrêmement ténue et transparente, et rappelle par sa forme pyramidale, autant que par sa transparence, la queue d'une comète. Cassini la compare à une chevelure du soleil. Elle réclame pour être observée la nuit noire, et ne peut pas être vue du fait de la clarté ambiante lorsque les crépuscules sont longs, au solstice. La lune, les brouillards, la proximité de la voie lactée la masquent à nos yeux. Cassini en déduit l'existence d'une matière rayonnant vers la Terre, soit lumineuse par elle-même, soit réfléchissant les rayons venant du soleil ou d'un autre corps lumineux. Il suggère que la sphère d'atomes de cette matière peut rencontrer la sphère d'atomes de la Terre dans l'extrait suivant :

La Sphère des Atomes du Soleil peut former la matière de cette lumière ; & une très grande Sphère d'Atomes concentrique à la terre dans la rencontre du plan de l'Équateur du Soleil, pourrait l'arrêter, la faire assembler en abondance, détourner son cours deçà & delà, & la faire paraître plus étendue en longueur & moins en largeur, que si elle s'étendait librement à une moindre distance.

Il trace ainsi la voie qui sera suivie par Mairan dans son explication des aurores boréales (1733), à savoir la précipitation de matière solaire dans l'atmosphère de la Terre.

La lumière zodiacale s'affaiblit par période, ce qui explique que Cassini ne l'ait pas vue entre 1663 et 1683. On trouve à l'entrée LUMIÈRE ZODIACALE de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert des informations précises sur son observation. Après 1683, elle est observée par Fatio de Duillier à Genève (1684-1686), et par Gottfried Kirch et Georg Christoph Eimmart en Allemagne (1688-1694), puis les observateurs s'en désintéressent. La lumière zodiacale a été aperçue bien avant Cassini, et ceci depuis l'antiquité, en particulier par le savant anglais Joshua Childrey en 1659, ainsi que par Descartes, d'après Mairan. Elle est mentionnée par Sénèque, et a été observée par le poète et savant persan Omar Khayam autour de l'an 1000. Mairan rapporte que les observateurs anciens confondent souvent les queues de comètes avec les aurores, ou la lumière zodiacale, fait qui milite en faveur de la correspondance de l'aurore boréale et de la lumière zodiacale, qu'il défend. Il cite des poèmes de Pontanus qui, au XV^{ème} siècle, « parle

d'une apparence de Coin, de Cône, & de Pyramide, qui se perd dans le Ciel », évoquant la lumière zodiacale. Il relate également l'observation par Nicéphore Calliste d'une éclipse de soleil en l'an 410 :

Il y eut encore alors, [dit-il], une Éclipse du Soleil, pendant laquelle l'obscurité fut si grande, que les Etoiles parurent en plein jour [...] On vit aussi en même temps dans le Ciel avec le Soleil éclipsé, & au-dessus de lui, une clarté singulière, qui avait la figure d'un Cône, & que quelques personnes peu instruites prirent pour une Comète. Mais il n'y avait rien là de semblable à une Comète : car cette clarté ne se terminait point en Queue ou Chevelure de Comète, & n'avait point d'Etoile aussi [qui en pût représenter le Noyau]. C'était plutôt une espèce de flamme, qui subsistait par elle-même, semblable à celle d'une grande Lampe, & d'où il partait une lumière fort différente de celle des Etoiles.

Cette observation simultanée d'une éclipse de soleil et de la lumière zodiacale dans sa forme pyramidale est unique dans l'histoire, car durant les éclipses totales de soleil, on ne voit la plupart du temps que le halo lumineux circulaire qui entoure le disque solaire, ce qu'il faut attribuer selon Mairan à l'extrême ténuité de la lumière zodiacale distante du soleil, que la lumière du halo empêche de voir. Ainsi que l'écrit Mairan (1733) :

Car on a vu, ou l'on sait qu'en 1706, & en 1724, par exemple, aux Éclipses totales de Soleil qu'il y eut dans ces deux années, l'une dans les parties Méridionales de France, l'autre dans les Septentrionales, on sait, dis-je, que dès que le Disque de la Lune eut entièrement caché celui du Soleil, & même un peu auparavant, il parut autour de lui un Limbe éclairé, & une espèce de chevelure d'autant plus épaisse qu'elle approchait davantage de sa circonférence. Mais aussi ne voit-on d'ordinaire dans les Éclipses totales du Soleil que cette partie inférieure de son Atmosphère : celle qu'on observe le soir, ou le matin, & qui suit la Lumière Zodiacale, est presque toujours alors imperceptible ; je dis d'ordinaire & presque toujours, parce que j'ai lieu de croire, comme je le rapporterai ailleurs, qu'il y a eu des cas si favorables, & où l'Atmosphère du Soleil était si étendue, & si épaisse, qu'on l'a vue sous la forme d'un Cône & d'une Pyramide pendant les Éclipses mêmes, comme on la voit en qualité de Lumière Zodiacale.

Le cas favorable évoqué par Mairan est précisément celui de l'éclipse de l'an 410 relaté ci-dessus, qu'il commente longuement, concluant malgré tout, qu'en l'absence de relevés d'observation détaillés, il est difficile de certifier la véracité de la figure observée.

L'existence d'une atmosphère autour du soleil, suggérée par la découverte des taches solaires, l'est également par le fait que durant les éclipses totales de soleil, comme on vient de le noter,

la nuit n'est jamais complète, fait déjà relevé par Kepler près d'un siècle plus tôt dans son *Epitome Astronomiae Copernicae* (1621). Voici ce qu'en dit Mairan (1747) :

Mais il y a plus, lorsque le Soleil vient à s'éclipser, & à nous être totalement caché par le globe de la Lune, on voit autour du disque de celui-ci, une lumière de 4, 5 ou 6 doigts ou plus de largeur, très-vive, & d'autant plus vive, qu'elle approche davantage de son disque, ou de celui du Soleil, d'où elle va en diminuant jusqu'à ce qu'elle se perde dans le ciel. C'est cette espèce de frange solaire que Kepler a si bien décrite, qui a été vue des Anciens, & qu'ils ont prise aussi quelquefois pour les bords du Soleil même, & pour une éclipse annulaire ; mais qui en a été distinguée, & qu'on a clairement aperçue dans toutes les éclipses totales de Soleil arrivées de nos jours. Eh! que serait-ce autre chose que l'atmosphère du Soleil, dans sa partie la plus dense, la plus lumineuse par elle-même, ou la plus exposée à l'éclat & à la densité des rayons solaires qu'elle nous réfléchit !

La théorie de l'atmosphère solaire développée par Descartes au milieu du XVII^{ème} siècle, suite à l'observation des taches solaires, fournit d'emblée un cadre cohérent pour expliquer la lumière zodiacale, d'où l'interprétation physique qui en est faite aussitôt par Cassini. Ainsi que le relate Bailly (1785), Cassini attribue au soleil une force expansive intrinsèque « *puisque'il se purifie, puisque'il jette à sa surface une matière crasse & épaisse comme celle des taches, & envoie la lumière, plus subtile & plus légère, jusqu'à nous qu'elle éclaire* ». Pour Cassini, c'est l'action de cette force « *qui chasse dans le plan de l'équateur du soleil une matière moins solide que les taches, & plus dense que la lumière* ». Ainsi, la lumière zodiacale est pour lui « *un amas de matière, ou un peu lumineuse, comme écoulée du soleil, ou seulement capable de nous réfléchir ses rayons ; elle enveloppe cet astre, mais sous une forme longue & aplatie, telle que celle de deux cônes joints par leur base, ou d'un fuseau dont le soleil occupe le milieu* ». La Lande (1771) fournit des chiffres précis concernant l'extension angulaire de la lumière zodiacale :

La longueur de la lumière zodiacale, prise depuis le soleil qui en est la base, jusqu'au sommet, paraît quelquefois de 45°, quelquefois de 100 ; M. Pingré l'a vu de 120° dans la zone torride ; sa largeur, dans sa partie visible vers l'horizon, va entre 8° & 30°, suivant les circonstances ;

[...]

On ne doute point aujourd'hui que la lumière zodiacale ne soit l'atmosphère du soleil, car elle accompagne toujours cet astre ; & l'on verra dans le XX^{ème} livre que l'équateur du soleil est placé de la même manière que la lumière zodiacale, ce n'est donc probablement qu'une atmosphère placée dans le sens de l'équateur, & aplatie par le mouvement de rotation du soleil.

En se basant sur la théorie des tourbillons, Jacques Cassini calcule les hauteurs des atmosphères des planètes et du soleil mettant en conformité la théorie de Descartes et les lois de Kepler (1735). Il considère que le mouvement de rotation du tourbillon d'une planète lui est communiqué par frottement sur l'éther environnant et, pour satisfaire les lois de Kepler, l'altitude de la frontière doit se situer à la hauteur à laquelle un corps en rotation autour de la planète tournerait de façon synchrone avec celle-ci. Cela revient à se demander, pour la Terre par exemple, quelle devrait être la hauteur de l'atmosphère, pour que l'ensemble formé de la Terre et de son atmosphère, supposé rigide, tourne sur lui-même précisément en 24 heures. Cassini trouve une hauteur de 40 000 km (valeur bien connue qui correspond à l'altitude de l'orbite géostationnaire). Il applique ce raisonnement aussi au soleil et cherche à quelle altitude au-dessus de la surface du soleil un corps en orbite circulaire fait un tour en 27 jours. Il trouve une hauteur de 22 millions de kilomètres, soit à peu près la moitié de la distance de Mercure au soleil. Cette valeur, en accord avec l'idée d'une grande extension de l'atmosphère solaire, est néanmoins nettement inférieure à l'extension de la lumière zodiacale, assimilée à l'époque à l'atmosphère du soleil, qui peut excéder 150 000 000 km, la distance de la Terre au soleil. Voici, sous la plume de Fontenelle (1735), l'argument donné par Cassini pour expliquer cette différence :

M. Cassini répond à cette difficulté, qu'il est fort possible que la lumière Zodiacale s'étende beaucoup au-delà de l'Atmosphère du Soleil proprement dite, qui ne sera qu'un amas des vapeurs & des fumées du Soleil les plus grossières, dont la pesanteur les aura empêché de monter plus haut. Un pareil amas paraît plus propre à composer une Atmosphère qui ne se détache point du Corps central, & qui ait assez de solidité pour donner prise à l'impression d'où résulte la rotation.

2.4 L'exemple du modèle de Hartsoeker fusionnant les taches solaires, les comètes et la lumière zodiacale au sein d'une représentation unique

Le modèle de Hartsoeker (1794) s'inspire directement de la conception de l'atmosphère solaire développée par Descartes suite à la découverte des taches. Le « *Soleil n'est qu'un très grand amas du premier élément* », et « *ce feu a continuellement besoin de nourriture, qu'il prend sans cesse de l'air qui l'environne* » et « *toute la surface du Soleil est toujours entourée d'une espèce de fumée assez légère qui s'éloigne continuellement de son centre, par la même raison que la fumée de notre feu s'éloigne du centre de la terre* ». Après avoir expliqué que « *cette fumée doit descendre derechef vers le Soleil, lorsque plusieurs de ses petites parties se sont conglomérées*

& devenues par conséquent assez pesantes pour y pouvoir retourner », il mentionne que cette fumée, si elle s'éloigne suffisamment du soleil pour qu'elle puisse réfléchir vers nous ses rayons, paraîtra comme « *espèce de lumière semblable à celle que l'on commence à observer vers l'écliptique, ou entre l'écliptique & l'équateur du Soleil [la lumière zodiacale], & à quoi il semble que les Anciens n'ont jamais pris garde* ». Et si elle s'en éloigne encore davantage, formant une masse assez grosse pour ne pas se dissiper pendant quelques temps, elle « *pourrait faire voir dans le ciel des croix, des épées, des batailles, & mille autres choses [une aurore boréale], suivant que le hasard disposerait différemment les parties de cette fumée* ». Ainsi son explication englobe-t-elle le phénomène des aurores, que Mairan reliera 40 ans plus tard très directement à l'effet de la matière solaire, bien que dans une représentation différente, et plus élaborée.

Puis vient la description de l'hypothèse elle-même, dans la droite ligne de l'idée d'Hévélius (qui n'est cependant pas cité) :

Mais s'il arrive qu'une masse assez considérable de la matière du second élément, s'assemble dans le corps du Soleil ; elle s'y formera en une espèce de globe, à cause qu'elle y sera également pressée de toutes parts. Or si ce globe, qui pourrait égaler, & même surpasser quelquefois toute la terre en grandeur, est poussé hors du Soleil ; il s'en éloignera avec d'autant plus de rapidité, qu'il sera plus léger que la matière éthérée qui le doit recevoir ; & continuera sa route jusqu'à ce qu'ayant passé bien au-delà de l'endroit de son équilibre, il soit obligé de retourner vers cet astre, avec la même rapidité qu'il en était parti, & de s'y plonger de nouveau. Et si ce globe est assez léger pour s'avancer jusqu'au chemin de Mars ou de Jupiter, ou plus loin, en sorte que les rayons du Soleil qui le rencontrent pendant qu'il passe par l'hémisphère, où est la terre, se puissent réfléchir vers nous ; il est manifeste que ce globe paraîtra décrire dans le ciel un arc d'un grand cercle, ou du moins un arc qui s'en approche de fort près.

Et comme ce globe en sortant ainsi du Soleil comme d'une fournaise, ne peut être autre chose qu'un corps brûlant & fumant de tous côtés, il doit nécessairement être entouré d'une espèce d'atmosphère de fumée, qui étant de beaucoup plus légère que ce corps fumant lui-même, le doit quitter à mesure qu'elle s'en exhale, & le devancer assez considérablement.

Et comme les rayons du Soleil ne doivent pas seulement éclairer ce globe, mais aussi toute la fumée qui l'accompagne, il ne nous doit paraître que comme une étoile au milieu d'une chevelure, & avec une queue de lumière qui doit être dirigée à peu près à l'opposite du Soleil.

Pour Hartsoeker, le bloc ainsi détaché du soleil, de par sa taille immense, peut conserver sa chaleur pendant des mois et des années. Il décrit diverses géométries et chronologies de

l'émission des fumées, rendant compte de différents phénomènes que son système permet d'expliquer, ainsi que de la courbure de la queue des comètes. Il critique au passage, outre la doctrine aristotélicienne, la conception cartésienne de l'origine des comètes :

L'autre [Descartes] au contraire prétendant qu'elles sont de véritables étoiles fixes, qui après avoir été encroutées & chassées ensuite de leur place par des étoiles voisines, passent de tourbillon en tourbillon, les place à une si grande distance de nous, c'est-à-dire, à moitié chemin de la terre à une étoile fixe, lorsqu'elles sont encore visibles, qu'il rend son opinion pour le moins aussi peu vraisemblable que celle de l'autre [Aristote].

Il fait le calcul de la vitesse que devrait avoir une comète issue d'une étoile fixe, d'après la vitesse angulaire des comètes observées depuis la Terre, en supposant le diamètre du tourbillon solaire égal à 8000 fois le demi-diamètre de l'orbe de la Terre, et trouve que cette comète devrait parcourir 1 demi-diamètre de l'orbe de la Terre en 11 minutes, ce qui est manifestement absurde.

Il applique ensuite son modèle à la grande comète de 1680, dont le périhélie fut extrêmement bas (930 000 km, du même ordre de grandeur que le rayon du soleil qui vaut 696 000 km), la comète s'y confondant quasiment avec l'astre. Cette conjonction ne pouvait que frapper les astronomes au courant des idées d'Hévélius, d'autant que cette comète n'a été découverte par Gottfried Kirch qu'à la mi-novembre 1680, un mois seulement avant son passage au périhélie, lorsqu'elle était déjà relativement proche du soleil. Hévélius se livre dans son traité à une analyse détaillée de la trajectoire de la comète et de la chronologie des variations de grandeur et de luminosité de sa queue. Il était alors admis par les cartésiens français, derrière Cassini, qu'une comète se déplace « *d'un mouvement égal [...] le long d'une ligne droite trajectoire, ou par une portion de circonférence d'un cercle excentrique à la terre* », ainsi que l'explique Hartsoeker, ce qui bien sûr ne pouvait être le cas de cette comète dont la trajectoire fut fortement courbée par la proximité du soleil, et dont l'hypothèse qu'elle parcourait une ligne droite se traduisait par des variations de vitesse inexplicables sur une telle trajectoire. La théorie de Newton et Halley est à cette époque encore toute récente, ayant probablement peu diffusé dans le milieu savant, et Hartsoeker ne trouve d'autre explication logique à l'inégalité du mouvement de cette comète qu'une origine dans l'atmosphère du soleil, effectivement effleurée par la comète.

Dans son article publié suite à l'observation de la comète de 1707 (1708), Cassini fait le point sur les observations de diverses comètes, et discute notamment l'origine et la nature des comètes. Sont-elles des amas passagers de vapeurs, formé dans l'atmosphère du soleil, de la Terre ou d'autres astres, ou au contraire des corps planétaires compacts et durables ? Question à laquelle Newton, jamais cité dans l'article, a répondu depuis quelques temps déjà. Concernant le possible lien avec les taches solaires, voici ce qu'il écrit :

Il y a des auteurs modernes qui supposent que les Comètes sont produites par les taches du Soleil, qui flottant sur sa surface en forme de croûtes minces peuvent s'en détacher, & par quelque accident devenir semblable à des bâtons enflammés & former les Comètes.

Si cela était, elles recevraient par la révolution du Soleil autour de son axe une impression qui tendrait à les faire mouvoir à peu près suivant la direction de l'Équinoxial des Taches, qui comme on l'a expliqué en divers endroits, a une obliquité à l'égard de l'Écliptique de 7 à 8 Degrés ; je dis à peu près, car il peut y avoir quelques raisons Physiques qui l'en écartent un peu de côté & d'autre. L'on a cependant observé diverses Comètes qui déclinent considérablement de cette ligne, dont les unes, vont du Septentrion au Midi, & d'autres du Midi au Septentrion, comme il est arrivé à celle que nous avons observée à la fin de l'année dernière.

L'examen de nombreuses trajectoires de comètes montre une grande diversité dans leurs routes « dont la direction est souvent fort différente de celle du mouvement des taches du Soleil », et « donne lieu de juger que le principe du mouvement de ces Comètes est différent, de celui du mouvement des Planètes & des Taches du Soleil ». De façon surprenante, Jean-Dominique Cassini continue d'affirmer la trajectoire circumterrestre des comètes, semblant ignorer totalement les résultats de Newton et de Halley, ce dernier ayant publié trois ans auparavant, en 1705, les éléments des paraboles de 24 comètes. Cassini conclut son article de 1708 par les mots suivants :

Ces considérations & d'autres, que nous avons rapportées en divers Traités, & dans les Mémoires de l'Académie des années 1699 & 1702, nous portent à supposer que ces Comètes, dont le mouvement inégal en apparence se peut réduire à l'égalité, de même que celui des Planètes ordinaires, telles que font toutes celles que nous avons observées, sont plutôt une espèce particulière de Planète, comme plusieurs Anciens le supposaient, que de nouvelles productions formées par les exhalaisons de la Terre, du Soleil & des autres astres.

Ainsi, les théories d'Hévélius, reprises par Hartsoeker, sont-elles clairement écartées par Cassini au tout début du XVIII^{ème} siècle sur la base des observations existantes. Il faudra

attendre 1737 pour que Jacques Cassini prenne en compte explicitement la théorie héliocentrique des comètes de Newton, pour conclure après quelques circonvolutions de langage (1737) :

Mais revenons à notre Comète. Quoiqu'on eût pu, par les raisons que nous avons alléguées, rapporter son mouvement immédiatement à la Terre, nous n'avons pas cru devoir nous écarter du sentiment le plus communément reçu des Astronomes, que ce sont des Planètes qui font leurs révolutions autour du Soleil, à l'égard duquel elles décrivent des Orbes fort excentriques.

3. Matière solaire et hauteur de l'atmosphère au XVIII^{ème} siècle

C'est dans le foisonnement d'idées qui vient d'être décrit que s'inscrit la théorie des aurores boréales de Jean-Jacques Dortous de Mairan (1733), étroitement reliée à la question de la hauteur de l'atmosphère, puisque les structures caractéristiques de l'aurore sont observées à de grandes hauteurs, comprises entre 400 et 1200 km suivant les observations de Mairan et Maupertuis, ainsi qu'il est écrit à l'entrée HAUTEUR DE L'ATMOSPHERE de l'Encyclopédie méthodique (1819). L'auteur de l'article de l'Encyclopédie pose néanmoins à ce sujet deux questions à ses yeux essentielles, à laquelle il fournit des éléments de réponse :

[...] ; 1°. les aurores boréales, observées en même temps dans des lieux aussi éloignés, étaient-elles les mêmes? 2°. ce météore a-t-il effectivement lieu dans l'atmosphère?

On répond à la première question, que les descriptions faites par chaque observateur, présentaient des apparences semblables, & que les points déterminés étaient les mêmes sommets & arcs lumineux, ou des points de divers sommets concentriques au pôle, ce qui produit un effet équivalent à celui du même point.

Quant à la seconde question, il est fort difficile d'y répondre ; car, comment s'assurer si le phénomène se passe dans l'atmosphère ou hors de l'atmosphère ? Cependant, de Mairan remarque que l'aurore boréale suit visiblement les mouvements divers de l'atmosphère terrestre, parce que l'on n'aperçoit, dans aucune de ses parties, le mouvement extérieur du premier mobile, ou cette révolution apparente que les astres font régulièrement tous les jours autour de la terre, d'orient en occident.

Si la réponse à la seconde question sera admise assez rapidement au XVIII^{ème} siècle, il n'en va pas de même de la réponse à la première, qui est contestée dès le XVIII^{ème} siècle, par exemple par Halley, et jusqu'au XIX^{ème} siècle par des figures majeures du monde scientifique comme François Arago ou Alexander von Humboldt (Arago, 1825).

Par ailleurs, vers la même époque, Philippe de La Hire (1713) remet en question l'argument de Kepler émis un siècle plus tôt suivant lequel l'existence d'une atmosphère étendue du soleil a pu conduire à surestimer la hauteur de l'atmosphère calculée par la méthode des crépuscules par les astronomes arabes (Goldstein, 1977), cette hauteur (80 km, valeur que La Hire revoit à la baisse en incluant l'effet de la réfraction atmosphérique : 70 km) lui apparaissant beaucoup trop grande par rapport à la finesse de la couche d'atmosphère homogène requise (3,6 km) pour expliquer la réfraction de la lumière des étoiles (Kepler, *Epitome Astronomiae Copernicae*, 1621). Nous commencerons par examiner la question des crépuscules, avant d'en venir à celle, plus complexe, des aurores boréales.

3.1 Atmosphère solaire et effet sur la durée des crépuscules

Historiquement, c'est aux astronomes arabes que l'on doit les premières estimations de la hauteur de l'atmosphère à partir de l'observation de la durée du crépuscule, ou de l'aurore. Ils étaient sensibilisés à la question pour des raisons religieuses, liées au calcul des horaires de prière pour le matin et le soir. Sabra a montré en 1967 que Ibn Al-Haytham (Alhazen) n'est pas l'auteur du « *Traité sur les crépuscules* », comme on le croyait auparavant. L'auteur, l'un de ses contemporains du XI^{ème} siècle, est Ibn Mu'adh. Celui-ci fixe l'angle de dépression solaire au-delà duquel la nuit est complète à 18°, ou 19°. Goldstein (1976) indique que la référence la plus ancienne pour cet angle est Strabon, au I^{er} siècle av. J.-C., qui donne une valeur de 17,5°. Cette valeur est très proche de la valeur de 18° admise aujourd'hui pour le crépuscule astronomique, celui-ci se terminant lorsque les étoiles jusqu'à la magnitude 6 deviennent visibles. A partir d'un calcul trigonométrique simple, supposant que l'angle de dépression ultime avant la nuit correspond à un rayon entrant qui tangente la surface de la Terre, puis est réfléchi au sommet de l'atmosphère par les vapeurs supposées s'élever en elle (pas par l'air, qui serait trop ténu) sur une droite à nouveau tangente à la surface de la Terre qui rencontre l'œil de l'observateur au point tangent, Ibn Mu'adh trouve 85 km pour la hauteur de l'atmosphère, valeur qui deviendra 80 km dans la version de son traité traduite en hébreu. Le portugais Pedro Nunes est le premier européen à estimer la durée du crépuscule en 1541, en utilisant une valeur de l'angle de 16°, qui sera reprise par Tycho Brahé.

Kepler exprime des doutes sur la valeur de la hauteur de l'atmosphère qu'il trouve par la méthode des crépuscules (76 km). Pour lui, les méthodes d'estimation de la hauteur de l'atmosphère par la durée des crépuscules et par la réfraction devraient donner des résultats

similaires, puisqu'elles portent sur le même objet « atmosphère », défini à l'origine comme la région dont la hauteur est fournie par la durée des crépuscules, région où s'opère la réfraction de la lumière des astres à la frontière avec la matière de l'espace sublunaire. Kepler résout cette contradiction en invoquant trois explications possibles, que La Hire décrit et commente près d'un siècle plus tard (1713) : (i) l'occurrence de plusieurs réflexions successives, au lieu d'une seule, au sein de l'atmosphère ; (ii) la réfraction atmosphérique, (iii) la présence d'une atmosphère solaire lumineuse. Nous avons déjà commenté les deux premières explications (cf chap. 2). Concernant la troisième, elle est directement reliée à la question de l'atmosphère solaire. Nous avons vu à quel point Kepler a été impliqué dans l'évolution des idées en matière de physique solaire, étant le premier à suggérer que le soleil tourne sur lui-même (1609), avant même que cette rotation n'ait été observée, et entretenant dans les années 1610 une correspondance avec le père de Johannes Fabricius, l'un des découvreurs et observateurs des taches solaires. Ainsi que l'écrit Mairan (1733) :

Et c'est cette partie dense de l'Atmosphère qui environne le globe du Soleil, qui répand encore trop de clarté, & qui empêche que l'obscurité ne soit assez grande pour nous laisser voir ses extrémités, ou ce que nous appelons la Lumière Zodiacale, lorsqu'elle n'est pas d'une densité extrême. Képler a très bien connu, & très bien décrit cette apparence ; car après s'être fait la question, pourquoi les Éclipses totales de Soleil ne nous jettent pas dans une nuit profonde ? Il répond, que c'est à cause de la substance grossière qui environne le Soleil... (Epitom. Astr. Copern.)

Kepler était donc fondé à estimer que l'existence de cette lumière entourant le soleil était susceptible d'allonger la durée des crépuscules, et ainsi conduire à surestimer la hauteur des dernières couches réfléchissantes interceptant la lumière solaire. Il est cependant dans l'incapacité de fournir une estimation quantitative de l'erreur, dans l'état d'ignorance où on est alors de l'intensité et de l'extension de cette lumière. Ainsi que l'écrit La Hire (1713), qui s'est beaucoup intéressé à la question des crépuscules et de la hauteur de l'atmosphère, à propos de l'effet possible de l'atmosphère solaire signalé par Kepler :

& par une matière qu'il imagine autour du Soleil & qui en est éclairée, & il insiste fort sur cette pensée, car il rapporte plusieurs raisons pour la soutenir, dont une des principales est la figure courbe du crépuscule qu'on observe dans les nuits froides & sereines ; il ajoute que cette figure apparente est un segment de cercle qui se termine à l'horizon, [...]

La Hire développe un raisonnement géométrique pour montrer que l'arc du crépuscule, c'est-à-dire la zone de l'atmosphère éclairée par le soleil après son coucher, qui réfléchit vers l'observateur la lumière du soleil et dont le sommet, après s'être levé à l'est et avoir franchi le zénith, s'abaisse progressivement vers l'horizon où le soleil s'est couché, est précisément la figure géométrique qui est prise par Kepler pour l'atmosphère du soleil. Il démontre que le segment de cercle nommé par Kepler est en fait :

[...] une hyperbole qui est un peu altérée par la réfraction, & qu'il n'est pas nécessaire pour expliquer cette figure courbe du crépuscule, de recourir à une matière qui environne le soleil, & que ce n'est que l'atmosphère qui doit la produire, car une semblable matière troublerait beaucoup les phénomènes célestes.

La Hire insiste en conclusion de sa démonstration sur l'erreur de Kepler, qui a attribué une forme circulaire à la figure de l'arc crépusculaire :

L'œil [...] doit donc juger que la figure de l'arc du crépuscule est hyperbolique. Mais de plus, la courbure d'un arc hyperbolique étant plus plate aux deux côtés de son sommet, que la courbure d'un arc de cercle, paraîtra encore plus aplatie vers l'horizon, où la réfraction élèvera cet arc beaucoup plus que vers son sommet, ce qui fera encore la différence plus grande entre la courbure du crépuscule & un arc de cercle.

Bailly (1785) traite les cas des trois éclipses totales de soleil qui ont eu lieu en vingt ans au début du XVIII^{ème} siècle (1706, 1715, 1724). Il écrit à propos de l'éclipse de 1706 :

Dans toutes les villes où l'éclipse fut totale, on vit autour de la lune comme un anneau d'or, une couronne d'une lumière pâle, égale en étendue à un doigt du disque solaire. À Montpellier on observa que cette couronne était environnée d'une autre plus grande ; sa lumière, toujours de plus en plus faible, s'étendait à huit degrés, & finissait par se confondre avec l'obscurité du ciel.

Cette apparence singulière fut la confirmation du soupçon & de la prédiction de D. Cassini. Quand il eut aperçu la lumière zodiacale, il la regarda comme l'atmosphère du soleil ; il annonça qu'elle devait lui former une couronne dans ses éclipses totales. L'anneau ici observé était donc l'atmosphère du soleil.

Il mentionne que si cette lumière n'a pas la forme de fuseau de la lumière zodiacale, c'est que l'obscurité n'est pas assez profonde. Concernant l'éclipse de 1715, partielle à Paris, Halley a calculé la hauteur de l'atmosphère de la lune requise pour expliquer le halo, et a trouvé 260 km,

ce qui est jugé par lui invraisemblable, et joue en faveur de l'hypothèse de l'atmosphère solaire. L'éclipse de 1724 est totale à Paris, avec un anneau clair de l'ordre de 1/10 du diamètre solaire autour de la lune. La Hire explique le halo, non par l'existence d'une atmosphère solaire, dont il ne touche mot, mais par un éparpillement de la lumière réfléchiée par les irrégularités de la surface lunaire (1715). Il fait pour cela une expérience qui consiste à placer devant un corps lumineux une pierre ronde de couleur grise et non polie l'occultant en totalité, et constate que les bords de la pierre apparaissent plus clairs.

3.2 Atmosphère solaire et aurores boréales

L'abbé Pierre Bertholon, dans la longue analyse qu'il présente pour l'entrée AURORE BORÉALE du Dictionnaire de physique (1793), dresse un panorama historique extrêmement complet de l'observation des aurores boréales. Il cite Aristote, témoin d'une aurore en Macédoine :

Aristote compare l'aurore boréale à une flamme mêlée de fumée, à la lumière d'une lampe qui s'éteint, & à l'embrassement d'une campagne dont on brûle le chaume. Elle a principalement cette apparence, lorsqu'elle s'étend beaucoup en longueur & en largeur. Ce sont, dit-il, de ces phénomènes qui ne paraissent que pendant la nuit, & dans un temps serein. Le gouffre désigne, selon lui, le segment obscur ; il nomme tisons allumés, torches, lampes, poutres ardentes, les colonnes, les jets de lumière qu'on remarque souvent dans ce phénomène. Selon cet illustre philosophe, les couleurs le plus généralement répandues sur le phénomène, sont le pourpre, le rouge vif & la couleur de sang Liv. I^o des météores d'Aristote, Cf chap. IV & V.

Cette description souligne le caractère inquiétant des aurores, considérées comme des signes de mauvais augure selon Pline, et bien d'autres après lui. C'est au XVIII^{ème} siècle, avec le philosophe allemand Frobès, et le français Mairan, que les premiers catalogues d'aurores, couvrant plus de mille ans d'histoire de leurs observations, sont établis au prix d'un travail de fouille d'archives considérable. Suite à la reprise des aurores au début du XVIII^{ème} siècle, après un siècle de faible activité solaire qui s'est traduit par une raréfaction des aurores vues sous nos latitudes, Edmond Halley, en Angleterre, et Jean-Jacques Dortous de Mairan, en France, sont chargés par leurs Académies respectives de fournir une explication rationnelle du phénomène.

Halley, qui a été témoin de la grande aurore de mars 1716, en propose la première explication scientifique (Halley, 1717). Aucun événement de ce type ne figure dans les annales anglaises

depuis 1574. Des « lances brûlantes » ont été vues sur Londres en 1760. Halley avance d'abord l'explication en termes de vapeur sulfureuse, qui est celle alors privilégiée par de nombreux savants, pour, dans un deuxième temps, expliquer qu'elle peut difficilement générer un phénomène d'une aussi grande extension spatiale que l'aurore boréale, et proposer une possible origine magnétique. Il argumente sur le fait que les aurores sont vues le plus souvent au nord-ouest (Islande, Groënland), précisément au voisinage du pôle nord magnétique, tel qu'il était positionné à son époque. Les jets lumineux sont identifiés à des colonnes de vapeur magnétiques s'élevant verticalement de la surface de la Terre, et se disposant comme de la limaille de fer autour des lignes de champ magnétique. Il évoque le fait que les colonnes, s'élevant jusqu'au-dessus de l'ombre de la Terre peuvent être éclairées par le soleil, comme un ciel de crépuscule. Il n'exclut pas que les vapeurs magnétiques puissent rayonner aussi de leur lumière propre. Pour lui, les vapeurs s'élèvent au-dessus de l'atmosphère, et l'aurore n'est pas un phénomène à proprement parler atmosphérique, bien qu'elle tourne avec la Terre. Il ne se prononce pas sur la nature de la matière composant l'effluve magnétique :

On peut trouver hardie mon hypothèse selon laquelle les effluves de matière magnétique que j'invoque pour ce propos, dans certains cas peuvent elles-mêmes devenir lumineuses, voire parfois soulever avec elles, hors des entrailles de la Terre, une sorte d'atomes propres à produire de la lumière dans l'éther. Je réponds que nous ne sommes pas encore informés d'autres types d'effluves de matière terrestre pouvant servir notre objectif, que ceux que nous avons examinés ici, à savoir les atomes magnétiques et ceux de l'eau fortement raréfiée en vapeur.

Des explications plus détaillées sur cette question sont fournies au chapitre suivant (cf chap. 4). Pierre Bertholon, dans le Dictionnaire de physique (1793), émet plusieurs critiques à l'encontre de l'explication de Halley, dont deux sont particulièrement pertinentes, à savoir d'une part que le fluide magnétique, d'après la théorie de Descartes, est supposé circuler sans interruption dans l'aimant terrestre, cette circulation étant la cause intrinsèque de la force magnétique, ce qui devrait entraîner une aurore permanente, d'autre part que le fluide magnétique n'est pas observé au laboratoire comme émettant de la lumière, en particulier que l'aimant, même chauffé au rouge, ne rayonne pas.

Mairan publie en 1733, suite à la grande aurore de 1726, un long traité qui est une réponse à la demande d'éclaircissement de l'Académie des Sciences. Nous avons mentionné les écrits de Cassini (1693) relativement à sa découverte de la lumière zodiacale, avec notamment cette idée

qu'une « *très grande sphère d'atomes concentriques à la Terre* » peut arrêter et faire assembler en abondance « *la sphère des atomes du soleil* ». C'est ce concept que Mairan va reprendre en l'approfondissant, et en introduisant l'attraction newtonienne comme moteur de l'incorporation de la matière solaire à l'atmosphère terrestre. On note au passage, dans le même ensemble de textes de Cassini, une référence à une aurore boréale observée au-dessus du Groënland, qui ressemble au phénomène vu par Pierre Gassendi en 1621, cité dans de très nombreuses sources comme l'événement « fondateur », phénomène auquel Gassendi a donné le nom d'*aurore boréale*. Cassini indique que le phénomène vu par Gassendi ne s'apparente ni au crépuscule, ni à la lumière zodiacale, mais se demande par contre si l'aurore groenlandaise en question ne serait pas plutôt un crépuscule mêlé de lumière zodiacale. En la quasi-absence d'observations relatées d'aurores boréales au XVII^{ème} siècle, Cassini juge en effet ce phénomène tout-à-fait exceptionnel, même si quelques témoignages en font état dans le millénaire qui précède.

En se basant sur le fait que le sommet de la lumière zodiacale s'écarte fréquemment du soleil d'un angle supérieur à 90°, ce qui montre qu'elle peut englober jusqu'à l'orbite terrestre à certaines périodes, Mairan argumente que, lorsque la terre traverse l'atmosphère solaire, celle-ci doit être attirée par elle en deçà d'une certaine distance qu'il calcule en équilibrant les forces d'attraction gravitationnelles de la Terre et du Soleil selon Newton. Ce calcul, physiquement incorrect car il ne tient pas compte des forces d'entraînement liées à la rotation de la Terre et du Soleil autour de leur centre de gravité commun, débouche sur une distance de 240 000 km, très inférieure à la vraie distance d'équilibre (celle du point de Lagrange L1 à la Terre, soit 1,5 millions km), mais il permet à Mairan de chiffrer la distance d'interaction nécessaire pour que l'accrétion de la matière solaire se produise. La théorie de Mairan, qui emprunte beaucoup au cartésianisme dans son essence, intègre aussi l'idée de la pesanteur universelle newtonienne, même si celle-ci n'apporte aucune valeur ajoutée quantitative à la théorie. Ainsi que l'explique Le Gars (2015), Mairan lui-même, dans son traité, précise qu'il veut s'en tenir le plus possible au fait, en dehors de tout système physique :

Nous n'en dirons pas davantage sur cet Article, trop dépendant, en un sens, du Système général de Physique que l'on aurait adopté : car nous tâcherons, autant qu'il nous sera possible, de conserver à nos recherches l'avantage de se soutenir avec tous les systèmes, en n'y admettant que des Observations et des faits qui puissent être avoués de part & d'autre.

Nous avons vu que dans la conception cartésienne, l'atmosphère du soleil est constituée d'un grand nombre de parties de grosseurs différentes, les plus subtiles s'étendant le plus loin. Cette hétérogénéité doit nécessairement se traduire, d'après Mairan, par une stratification de la matière solaire qui précipite dans l'atmosphère, générant les structures horizontales et verticales des aurores, expliquées par une combinaison de la stratification verticale, et de mouvements de chute de matière des couches hautes vers les couches basses. Il écrit :

C'est alors que la matière qui compose cette Atmosphère venant à rencontrer les parties supérieures de notre air, en deçà des Limites où la Pesanteur universelle, quelle qu'en soit la cause, commence à agir avec plus de force vers le centre de la Terre que vers le Soleil, tombe dans l'Atmosphère Terrestre à plus ou moins de profondeur, selon que sa pesanteur spécifique est plus ou moins grande, eu égard aux couches d'air qu'elle traverse, ou qu'elle surnage. Et comme il n'y a point d'apparence que cette matière ou cet air solaire, non plus que le nôtre, soit si parfaitement homogène, qu'il n'y ait aucune différence de figure, de grosseur, de contexture, & de poids dans les parties qui le composent, il doit descendre plus ou moins dans l'Atmosphère Terrestre, à raison du différent poids de ces parties, & s'y assembler sur des couches de différente hauteur.

Pour Mairan, la partie supérieure de l'atmosphère, à laquelle la matière solaire vient se mélanger, est composée d'air subtil, de subtilité intermédiaire entre l'éther et l'air grossier, mais traversant les pores du verre (cf chap. 6). La matière solaire peut être visible, soit parce qu'elle est lumineuse en elle-même, soit parce qu'elle est éclairée par le soleil, point sur lequel aucun des prédécesseurs de Mairan n'a tranché. Comme Halley, Mairan attribue les aurores à une matière subtile, à la différence néanmoins que cette matière solaire subtile est mélangée à la part subtile de l'atmosphère, sans contribuer à la force de pression car traversant les pores du verre du baromètre, tandis que chez Halley, matière magnétique et atmosphère sont découplées. Par ailleurs, Mairan s'efforce de déterminer la hauteur des aurores à partir d'observations des mêmes structures vues depuis différents points de la surface terrestre, Halley considérant que les structures de l'aurore, notamment les couronnes aurorales, sont, comme les arcs-en-ciel, propres à l'œil de l'observateur (cf chap. 4). Voici ce que Mairan écrit :

Ce qui rend tous ces Phénomènes visibles de la Zone Tempérée, & de lieux fort éloignés du Pôle, c'est la grande hauteur de la Région qu'ils occupent dans l'air, hauteur qui est prouvée & même déterminée jusqu'à un certain point par la Parallaxe sensible, & l'abaissement apparent régulier des Arcs & du Segment obscur, selon que l'observateur est placé plus loin du Pôle, & à des Latitudes décroissantes. D'où il suit, ou que l'Aurore Boréale consiste en une matière plus rare, & plus légère que les parties supérieures de notre air, quelque rare & quelque léger & délié qu'il doive être à ces grandes distances,

selon l'opinion commune, ou que l'Atmosphère est beaucoup plus élevée qu'on ne l'a cru jusqu'ici ; ce qui est, selon nous, bien plus probable, & que nous espérons de prouver.

Une difficulté de taille, dans la théorie de Mairan, est d'expliquer la localisation polaire des aurores, inhérente à la théorie concurrente de Halley. Mairan argumente en précisant que dans sa chute, la matière solaire est expulsée des régions équatoriales par les chocs avec les particules de l'atmosphère dotées d'une grande vitesse linéaire à cause de la rotation de la terre, et a tendance à migrer et se concentrer dans les régions de haute latitude, où la vitesse de la matière de l'atmosphère est faible ou nulle (au pôle). Les critiques de Bertholon vis-à-vis de la théorie de Mairan portent, notamment, sur la taille supposée considérable de l'atmosphère solaire, et sur le paradoxe qu'il y a à imaginer que l'atmosphère solaire, lumineuse par nature, ait besoin d'entrer en contact avec l'atmosphère terrestre pour « s'enflammer ».

Indépendamment de ces difficultés, et c'est sans doute l'un des points forts de son travail, Mairan établit un catalogue complet des aurores observées depuis plus de mille ans, et s'intéresse au fait que les aurores ont moins paru à certaines époques qu'à d'autres. Il observe qu'entre 1621 et 1686, aucune aurore marquée n'a été observée, que la reprise en 1686 ne dure que quelques années, et que le phénomène ne commence à reparaitre qu'en 1707, pour ne reprendre avec intensité qu'à partir de 1716. A l'échelle saisonnière, il cherche à démontrer que les aurores boréales sont plus fréquentes quand la Terre est au plus près du soleil, au voisinage du solstice d'hiver, que lorsqu'elle est au plus loin. Il trouve effectivement le déséquilibre attendu, tout en remarquant le biais lié à la durée plus importante des crépuscules vers le solstice, qui diminue les plages de temps durant lesquelles les aurores peuvent se détacher nettement au sein de l'obscurité ambiante. Mairan signale un lien possible entre les taches solaires et les aurores boréales :

M. Descartes, qui n'a pas ignoré l'Atmosphère Solaire, ce corps rare, qu'il appelle Air, comme celui qui environne la Terre, & qu'il étendait jusqu'à la Sphère de Mercure, & Au-delà, lui donnait aussi la même origine. Il croyait que les Taches en se dissipant, produisaient autant de nouvelles augmentations à l'Air Solaire, qui venant à retomber, servait lui-même à son tour de matière à de nouvelles Taches.

Ce qui paraît favoriser cette idée, c'est que depuis cinq à six ans, que les Aurores Boréales, suite ordinaire, selon notre hypothèse, des grandes extensions de cet Air, sont devenues si fréquentes, les Taches du Soleil l'ont été aussi beaucoup. On sait encore qu'au commencement du dernier Siècle, après l'invention des Lunettes, on ne voyait presque jamais le Soleil sans Taches ; & il en avait

quelquefois des amas si considérables, que le P. Scheiner dit y en avoir compté une fois jusqu'à cinquante. Elles devinrent ensuite plus rares : de sorte que depuis le milieu du Siècle jusqu'en 1670, c'est-à-dire, dans l'espace d'une vingtaine d'années, on n'en pût trouver qu'une ou deux, & qui parurent même fort peu de temps. Or comme nous l'avons vu, il y eut un grand nombre d'Aurores Boréales au commencement de ce Siècle, & jusques au-delà de 1621 ; après quoi l'on n'en entend plus parler jusqu'en 1686. Cependant il faut avouer qu'il n'y a encore rien de solide à établir sur cette correspondance apparente, & qu'elle ne se soutient pas toujours également.

Il faudra attendre un siècle pour que cette idée se concrétise par une observation systématique du lien entre les deux phénomènes. On ne peut manquer d'être frappé par la profondeur d'analyse de Mairan, dont la théorie, bien qu'inexacte aux standards de la physique actuelle, accorde au soleil le rôle majeur de déclencheur du phénomène, et recherche précisément des correspondances entre activités solaire et aurorale.

Euler propose peu de temps après (1746) une autre explication (cf chap. 8), s'inscrivant en défaut contre la théorie de Mairan. A propos du sentiment de Mairan, largement hérité du contexte décrit dans la partie 2 du présent chapitre, Euler déclare :

Ce sentiment est sujet à bien des difficultés, puisqu'on ne saurait comprendre, comment cette Atmosphère Solaire peut s'étendre à une si grande distance de soleil, pourquoi elle ne s'étend aussi qu'autour de l'Équateur du Soleil, & comment plusieurs Comètes ont des queues, quoiqu'elles n'atteignent jamais cette Atmosphère. Il est donc beaucoup plus probable que la Lumière Zodiacale même procède d'une pareille cause que les queues des Comètes & l'Aurore Boréale, en sorte que les particules qui forment la Lumière Zodiacale émanent du Soleil, de la même manière que les particules, auxquelles nous attribuons les queues des Comètes et la Lumière Boréale, procèdent de ces Corps mêmes. En effet le Soleil est environné autour de son Équateur d'une lumière qui s'étend à une distance prodigieuse, & qu'on appelle Zodiacale, les Comètes ont une lumière sous l'apparence de Queue dans la région à peu près opposée au Soleil, & la Terre paraît quelquefois revêtue d'une lumière qui se manifeste au Septentrion. Quelque différence qu'il y ait à divers égards entre ces Phénomènes, elle n'est pourtant pas telle qu'ils ne puissent être produits par la même cause. Car la diversité des Corps du Soleil, de la Terre & des Comètes peut tellement modifier l'action d'une même cause, qu'il paraisse en résulter des effets extrêmement dissemblables. C'est pourquoi je ne balance point à déduire ces trois Phénomènes de la même cause.

Ainsi, selon Euler, les queues des comètes et la matière des aurores ne sont pas d'origine solaire. Pour Mairan, ainsi qu'il l'explique dans sa réponse à Euler (1747), la croissance en luminosité

et taille des queues cométaires au voisinage du soleil prouve un rechargement périodique en matière subtile extraite de l'atmosphère solaire, leur disparition progressive après le passage au périhélie marquant l'épuisement du réservoir constitué par captation de l'atmosphère solaire. Mairan n'exclut pas qu'un peu de la matière prélevée au passage précédent n'ait pas été perdue, ce qui expliquerait que certaines comètes puissent avoir une queue visible avant d'avoir atteint l'atmosphère solaire, matérialisée par la lumière zodiacale, comme le lui objecte Euler. Mais pour lui, la matière légère et transparente des queues cométaires est une substance subtile, différente de la matière grossière qui constitue notre atmosphère. C'est ainsi qu'il explique que les rayons solaires puissent éjecter cette matière dans la direction antisolaire, se situant dans le prolongement de la pensée de Kepler qui a exprimé cette idée un siècle avant lui. Mairan s'inspire à n'en pas douter des théories qui plaçaient l'origine des comètes dans le soleil au siècle précédent (Hévélius, Hartsoecker), mais après les objections émises par Cassini (1708), il doit limiter cette idée d'une origine solaire à la matière subtile des queues cométaires, et non plus à la comète dans son ensemble.

Euler, à la différence de Mairan, estime que la matière des queues cométaire est une matière semblable à celle de notre atmosphère, et qu'elle est éjectée par l'action des rayons solaires. Il s'inscrit de ce point de vue dans la lignée de Newton et Halley, pour qui les comètes sont des corps planétaires comme les autres suivant des orbites keplériennes autour du soleil. Euler, dans son essai, s'attarde beaucoup sur le cas de la queue cométaire. Il valide son hypothèse de l'effet répulsif des rayons solaires sur le cas cométaire, avant de s'intéresser aux aurores boréales. Concernant celles-ci, il fait l'hypothèse qu'elles se forment par expulsion vers l'espace des corpuscules de la part la plus subtile de l'air chassés par les rayons solaires tangentiellement à la limite jour-nuit, phénomène logique si l'on assimile les rayons à des corpuscules dans la théorie newtonienne, mais moins évident dans l'approche ondulatoire de Huygens. Euler indique pour la hauteur de l'atmosphère une valeur de 6 km, voisine de celle estimée par Kepler plus d'un siècle auparavant. Il semble considérer que la hauteur de l'atmosphère déduite des crépuscules est de 180 km (en fait, plutôt 70 km) et invoque l'effet répulsif des rayons solaires pour expliquer la durée des crépuscules, attribuée par lui à la partie de l'atmosphère écartée par l'action des rayons solaires de l'atmosphère principale. Cela lui sert à estimer la vitesse de déplacement des particules d'atmosphère éjectées par les rayons solaire comme valant 180 km par heure, les particules atmosphériques pouvant ainsi être écartées de plusieurs diamètres terrestres en quelques jours. Ces altitudes considérables expliqueraient que des aurores soient vues jusqu'à 60° du pôle. Mais Mairan souligne que, dans ce cas, les particules atmosphériques

expulsées par le jeu de la réfraction des rayons devraient plutôt converger vers la zone équatoriale dans la direction antisolaire. Mairan démonte assez facilement les arguments utilisés par Euler pour justifier le caractère boréal des aurores dans son hypothèse.

Pour Euler, les aurores n'ont pas lieu dans l'atmosphère, mais à une distance considérable au-dessus de la surface terrestre. Il écrit :

Toutes les Observations qu'on a faites sur les Aurores Boréales, nous enseignent incontestablement, que la matière, dont la lumière produit ces Phénomènes, n'existe point dans notre Atmosphère ; mais qu'elle est extrêmement éloignée de nous. Car quoique sa vraie distance ne puisse pas être déterminée par les Observations, cependant l'éloignement des lieux, dans lesquels on voit souvent le même Phénomène à la fois, met en droit de conclure qu'il est placé à une très grande distance de la surface de la Terre.

Mairan pointera dans sa réponse le paradoxe que constitue cette couche d'atmosphère détachée, alors qu'on s'attendrait à une surélévation continue de toutes les couches de l'atmosphère, sans discontinuité. Jean-Baptiste Biot écrira plus tard (1820), à propos de l'hypothèse d'Euler :

Dans la disposition abstraite que lui donnait son génie pour les combinaisons purement analytiques, les considérations matérielles de la physique n'étaient pour Euler qu'un sujet auquel il pouvait appliquer le calcul ; et pourvu que sa passion fut ainsi satisfaite, il s'embarrassait peu s'il en résultait le roman de la nature ou son histoire.

Le système de Euler ne résistera pas longtemps à la critique, et celui de Mairan ne gardera que pour un temps les faveurs des scientifiques. A la même époque, en effet, Charles François de Cisternay Dufay publie dans les mémoires de l'Académie (1732) son idée d'une connexion intime entre magnétisme et aurores, et on trouve l'extrait suivant cité par Arago (1825) :

M. Halley, et plusieurs autres physiciens depuis lui, ont dit que la matière magnétique pouvait avoir quelque part aux lumières boréales...

On peut encore ajouter que, suivant les observations les plus exactes, le centre auquel aboutissent les rayons des aurores boréales décline presque toujours vers l'ouest de 14 ou 15°, ce qui est à peu près la quantité dont l'aiguille décline présentement. Si ce centre des rayons des aurores boréales venait à suivre à l'avenir les variations de l'aimant, cela pourrait nous mener à quelque chose de plus positif (sur la cause des aurores).

Dès 1740, Anders Celsius et Olof Hiorter vont plus loin en remarquant une agitation de l'aiguille de la boussole durant les aurores, avec une coïncidence entre les mouvements de l'aiguille enregistrés à Londres et à Upsala, l'agitation étant d'autant plus forte que l'aurore est haute dans le ciel, et que le foyer de l'aurore est éloigné du méridien magnétique. Cette découverte souligne elle aussi l'importance du magnétisme terrestre dans le phénomène.

Le pont qui manquait pour réaliser la synthèse des théories existantes, et qui ne viendra dans sa complétude qu'à la fin du XIX^{ème} siècle, est le lien entre électricité et émission lumineuse d'une part, électricité et magnétisme de l'autre. John Canton, au milieu du XVIII^{ème} siècle, est l'un des premiers à remarquer qu'un courant électrique traversant une enceinte vide d'air, ou à très faible pression, produit une lumière assez similaire à celle de l'aurore boréale. La découverte de l'existence de ce phénomène remonte à Jean-Felix Picard, un siècle plus tôt, qui transportant de nuit un baromètre à mercure, a remarqué une lueur, celle-ci s'expliquant par une génération d'électricité statique sur la paroi par frottement avec le mercure (cf chap. 6). Canton présente en 1753 un mémoire à la *Royal Society* dans lequel il défend l'idée que l'aurore boréale est produite par une décharge entre nuages électrisés positivement et négativement passant par la haute atmosphère, dont la résistance électrique est moindre. Il est soutenu par plusieurs physiciens. Bertholon (1793) lui oppose plusieurs critiques. Tout d'abord, les aurores ont lieu à des altitudes considérablement plus élevées que celle des nuages. Par ailleurs, la géométrie régulière et récurrente des aurores s'accorde mal avec l'idée d'un phénomène nuageux, par nature désordonné. Dans une lettre adressée en 1750 à son ami Collinson, Benjamin Franklin s'essaie, lui aussi, à fournir une explication de nature électrique faisant appel à la circulation générale de l'atmosphère de l'équateur vers les pôles. Bertholon mentionne d'autres explications fournies au XVIII^{ème} siècle, comme celle de Serantoni de Luque invoquant la réflexion des rayons solaires par les surfaces glacées fortement réfléchissantes des régions polaires, ensuite renvoyés par les particules de la haute atmosphère vers l'observateur, ou celle de l'abbé Hell des rayons solaires et lunaires réfractés par l'atmosphère, et réfléchis par des particules de glace des nuages. Réalisant lui-même des expériences d'électricité pour reproduire la lumière aurorale, il propose également une explication par l'électricité.

Il consacre par ailleurs un chapitre de son article à la hauteur de l'aurore boréale, regardée par les physiciens comme ayant son siège dans l'atmosphère terrestre. Il écrit :

[...] ; mais ces deux moyens [durée du crépuscule et pression de l'air] ne peuvent servir à déterminer exactement l'atmosphère , prise non pour l'amas d'air grossier qui est autour de la terre, mais pour le fluide quelconque qui enveloppe à une plus grande distance le globe de la terre & qui participe à ses mouvements.

[...]

Cet académicien [Mairan] osa avancer, en 1726, à l'occasion de l'aurore boréale du 19 octobre, qu'il fallait que la matière de ce phénomène eût été à plus de soixante-dix lieues au-dessus de la surface de la terre ; & que s'il en jugeait par quelques observations particulières, sa hauteur serait plus grande. Cette proposition étonna alors, parce qu'on était alors dans le préjugé que l'atmosphère avait peu de hauteur.

[...]

De quelques autres observations correspondantes faites à de plus petites distances, & qui sont en grand nombre, on a également conclu que la hauteur du phénomène était à 100, 200 & 300 lieues.

Nous reviendrons sur les estimations faites à partir de l'observation des structures aurorales (cf chap. 8). Le couplage entre électricité et magnétisme dans la production des aurores ne sera correctement aperçu qu'à la fin de la première moitié du XIX^{ème} siècle par John Dalton (1828). Qu'il nous suffise de dire qu'au milieu du XIX^{ème} siècle, on dispose d'un certain nombre de théories, autant de pièces du puzzle élaborées depuis une centaine d'années, dont aucune n'est satisfaisante. Jean-Baptiste Biot écrit à ce sujet en 1820 :

En passant ainsi en revue ces divers systèmes, on s'aperçoit que chacun d'eux se rapporte spécialement à quelque particularité du phénomène, sur laquelle il est fait et moulé, pour ainsi dire, tandis que les autres y sont oubliées ; de sorte qu'il y a du vrai dans tous, quoiqu'aucun ne soit totalement vrai. D'après le peu de succès de ces tentatives, il semble que l'on marcherait avec plus de sûreté si l'on prenait une route absolument inverse, c'est-à-dire, si l'on considérait chaque particularité observée comme une condition donnée par la nature ; et si, après en avoir constaté la réalité et pesé l'importance, on en faisait un caractère de la cause inconnue par laquelle ce phénomène est produit.

Résumons l'état de la question à la fin du XVIII^{ème} siècle. Halley a vu le magnétisme terrestre comme un élément central du phénomène, structurant la figure aurorale autour du champ magnétique de l'aimant terrestre, en invoquant une matière magnétique subtile circulant dans les pores de la Terre et s'élevant à une grande hauteur dans l'éther. Mairan a, lui, attribué au phénomène une origine solaire, imaginant qu'à la façon des comètes, la terre capte régulièrement la matière subtile de l'atmosphère solaire, qui vient se disposer en strates dans l'air subtil qui s'étend à une très grande hauteur au-dessus de la terre, le phénomène des aurores

se produisant donc dans l'atmosphère, ceci n'étant possible qu'à cause de l'extrême subtilité de la matière solaire et de l'air à grande hauteur. Avec Canton, et Franklin, l'hypothèse que ce sont des courants électriques circulant dans la haute atmosphère, très raréfiée, qui sont responsable des lueurs aurorales, qui auraient donc la même origine que la lumière qui naît d'un courant dans une enceinte où l'on a fait le vide, émerge d'expériences faites en laboratoire, au lieu que les conceptions de Halley et Mairan résultent plutôt de considérations philosophiques, comme celle de Descartes dans le premier cas, ou astronomiques, comme celle de Cassini portant sur l'origine de la lumière zodiacale, ou celle de Hévelius ou Hartsoeker postulant l'origine solaire des comètes, dans le second cas. Le couplage entre électricité et magnétisme dans la production des aurores est correctement aperçu par Dalton à la fin de la première moitié du XIX^{ème} siècle. Ces différentes conceptions contiennent en germe les éléments qui permettront, un demi-siècle plus tard, à Birkeland (1908) et Störmer, de comprendre le phénomène auroral. D'autres visions ont émergé, certaines de nature cosmique, comme celle de Euler qui attribue l'origine du phénomène à la pression exercée par le rayonnement solaire sur les particules de la haute atmosphère, prônant comme Mairan une origine solaire, mais suivant des modalités totalement différentes, d'autres de nature atmosphérique, exhalaisons qui s'enflamment ou réflexion de la lumière solaire par les surfaces englacées du grand nord.

Ainsi que le souligne Le Gars (2015), plusieurs spécialistes contemporains des relations soleil-terre attribuent à Mairan un rôle fondateur dans le développement de cette discipline. On lui doit en effet un énorme travail de recherche de sources pour l'établissement de son catalogue d'événements (1741 aurores sur la période 502-1733), et sa quête de régularités dans le phénomène. Il a le premier remarqué un lien possible entre le nombre de taches solaires et la fréquence d'apparition des aurores. Il a par ailleurs adopté une démarche baconienne de description détaillée des formes, des couleurs et des changements auroraux. En cela, la démarche de Euler, qui est un mathématicien, est à l'opposé de celle de Mairan, car Euler ne semble accorder que peu d'importance à l'observation, ainsi que le souligne Biot. Concernant la hauteur de l'atmosphère, Mairan est celui qui a le premier affirmé, sur la base d'observations précises et d'un modèle détaillé attribuant aux aurores une localisation atmosphérique, qu'elle était beaucoup plus grande qu'on ne le pensait au siècle précédent.

Comme nous l'avons déjà mentionné (cf chap. 2), cette tendance à placer le sommet de l'atmosphère de plus en plus haut au début du XVIII^{ème} siècle est fortement liée au parti-pris cartésien de nombreux savants importants de l'Académie. Nous y reviendrons (cf chap. 8).

Néanmoins, Mairan cherche explicitement à dégager sa théorie des écoles de pensée de l'époque (Le Gars, 2015), notamment de la dispute entre cartésiens et newtoniens. Nous sommes dans une période où les idées de Newton commencent à s'imposer en France, et la pensée newtonienne ne peut plus être exclue sans nuance, ce que montre par exemple l'article de Fontenelle (1708), cartésien de la dernière heure, dans lequel il concède, avec beaucoup de réserves, quelque crédit à la notion de vide et d'attraction universelle pour expliquer les trajectoires des comètes. Mairan, qui a proposé lui-même en 1725 une explication pour rendre compatible la théorie des tourbillons et les trajectoires des comètes, à savoir un tourbillon solaire extrêmement aplati, est un cartésien assumé. Son modèle, dans lequel la théorie de Newton n'apporte pas de plus-value quantitative, est incontestablement d'essence plutôt cartésienne. Il faudra attendre les années 1740 pour la théorie newtonienne triomphe définitivement à l'Académie des Sciences, c'est-à-dire à peu près la période d'élaboration du modèle de Euler, qui n'est pas cartésien, et ne fait appel à aucune matière subtile.

4. Conclusions

Le caractère le plus saisissant des théories de la matière solaire en relation avec la représentation de l'atmosphère au XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle, est celui d'un système complet auto-cohérent, ou jugé comme tel, englobant la lumière zodiacale, les queues des comètes, le halo solaire entourant le disque lunaire durant les éclipses de soleil, et les aurores boréales au sein d'une même représentation unifiée du système planétaire baignant dans l'atmosphère étendue du soleil, matérialisée par la lumière zodiacale. Sur la base d'une ressemblance de luminosité et de texture entre ces différents milieux, tous également transparents à la lumière des étoiles placées à l'arrière-plan, les savants de l'époque développent une vision intégrée de la sphère d'influence du soleil. S'appuyant sur la description théorique de l'atmosphère du soleil faite par Descartes, à savoir un milieu soumis en permanence et alternativement à des processus de solidification (les taches) et de dissolution de la matière solide, et convaincu d'un lien très étroit entre les queues cométaires et la matière de l'atmosphère solaire, notamment après le passage de la grande comète de 1680 qui a frôlé la surface du soleil, les savants cartésiens comme Hartsoeker développent des théories globalisantes présentant les comètes comme des émanations solaires. C'est au sein de ces représentations que Mairan va puiser son idée d'une précipitation de matière solaire dans l'atmosphère terrestre, tout comme, selon lui, les comètes se rechargent en matière subtile du soleil à chacun de leur passage au périhélie. C'est sur cette analogie qu'il fonde son idée d'une matière subtile solaire précipitant au sein de la matière

subtile du haut de l'atmosphère, la grande hauteur des aurores, telle qu'on peut l'estimer à partir des observations des centres des arcs auroraux réalisées par triangulation, étant très supérieure à la hauteur de l'atmosphère déduite de la durée des crépuscules, et exigeant une matière autrement plus légère. La nature subtile des queues cométaires a été proposée par Kepler un siècle plus tôt, et Descartes a postulé la présence de ses premier et deuxième éléments en abondance dans le soleil et son environnement immédiat, impliquant la présence de matière subtile dans l'atmosphère du soleil. Cassini a observé une extension de la lumière zodiacale qui peut aller jusqu'à englober, à certaines époques, l'orbite de la Terre. Newton a établi sa loi de la gravitation universelle, et tous les éléments sont donc en place pour que Mairan, s'inspirant de la ressemblance texturale entre les queues cométaires et les aurores, conjecture que c'est l'accrétion gravitationnelle de l'atmosphère solaire par la Terre qui est à l'origine des aurores boréales. Euler, à partir de la même idée, mais sans faire appel aux matières subtiles, auxquelles il ne croit pas, compare directement l'aurore à une queue cométaire détachée de son astre sous la poussée de la lumière solaire, plaçant ainsi, contrairement à Mairan, l'aurore en-dehors de l'atmosphère et très au-dessus d'elle. Un siècle plus tôt, Kepler avait fait appel à l'atmosphère solaire pour expliquer la durée anormalement longue des crépuscules au regard de la faible hauteur de l'atmosphère qu'il déduisait de son modèle de réfraction atmosphérique de la lumière des étoiles. Dans les deux cas, la question de la hauteur de l'atmosphère était à l'origine de l'invocation d'une origine solaire pour expliquer une incohérence majeure entre les hauteurs calculées suivant différentes méthodes (réfraction et crépuscules pour Kepler, crépuscules, pression de l'air et aurores boréales pour Mairan). Ainsi que nous l'avons dit, l'opposition entre cartésiens et newtoniens n'est pas une caractéristique fondamentale du débat qui s'instaure autour de l'aurore boréale au XVIII^{ème} siècle, même si les deux grandes théories concurrentes de la première moitié du siècle sont bâties sur l'héritage cartésien (caractère subtil de l'atmosphère solaire dans la théorie de Mairan, analogie de la terre avec un grand aimant dans la théorie de Halley), et sont clairement plutôt de nature cartésienne, même si Halley ne l'est fondamentalement pas, et Mairan revendique sa neutralité en la matière. Malgré l'inexactitude des théories au regard des connaissances actuelles, on remarque la force et la justesse des intuitions sous-jacentes à chacune de ces théories : l'influence du magnétisme terrestre pour Halley, la recherche d'une cyclicité du phénomène et la proposition par Mairan d'un lien à rechercher entre le nombre de taches solaires et la fréquence de l'aurore boréale, deux intuitions qui contiennent en germe la solution de l'énigme, qui ne sera définitivement résolue qu'à la fin du siècle suivant.

Chapitre 4. Matière magnétique

1. Introduction

Après avoir décrit au chapitre précédent le système développé par Jean-Jacques Dortous de Mairan pour expliquer les aurores boréales, nous consacrons le présent chapitre au système concurrent proposé par Edmond Halley, et à la façon dont il s'inscrit dans l'évolution de la pensée de l'époque concernant la physique de l'aimant, et plus généralement le magnétisme. Dans un premier temps, nous exposons les conceptions de l'aimant développées au XVII^{ème} siècle par Descartes et Gassendi, la première constituant la référence pour près d'un siècle, même auprès de savants non cartésiens comme Newton, et dressons un panorama succinct des connaissances en magnétisme à l'aube du XVIII^{ème} siècle. Puis nous décrivons l'explication de l'aurore boréale proposée par Halley, qui fait appel à la matière magnétique et à tout l'arrière-plan conceptuel fourni par Descartes, ainsi que les conséquences de son hypothèse sur les travaux de plusieurs savants qui se sont intéressés au magnétisme dans le courant du XVIII^{ème} siècle. Enfin, nous montrons comment l'hypothèse de la circulation de la matière magnétique a été progressivement abandonnée à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle, période pendant laquelle a prédominé l'explication électrique de l'aurore boréale, occultant quelque peu l'hypothèse de Halley.

2. Principales conceptions du magnétisme au XVII^{ème} siècle

2.1 Théorie de l'aimant de Descartes et conception de Gassendi

La théorie de l'aimant de Descartes s'inscrit dans sa vision plus large du cosmos comme ensemble de tourbillons emplissant tout l'espace, qui ne doit comporter dans le schéma cartésien aucune « *espace vide* », aux centres desquels se trouvent les astres. Ces tourbillons sont remplis de matière, celle-ci se présentant sous trois formes, décrites ainsi dans l'article 52 des Principes :

[...] tous les Corps de ce Monde Visible sont composés de ces trois Formes qui se trouvent en la Matière, ainsi que de trois divers Éléments, à savoir que le Soleil & les Etoiles fixes ont la Forme du premier de ces Éléments, les Cieux celle du second, & la Terre avec les Planètes & les Comètes celle du troisième. Car voyant que le Soleil & les Etoiles fixes envoient vers nous de la lumière, que les

Cieux lui donnent passage, & que la Terre, les Planètes & les Comètes la rejettent & la font réfléchir, il me semble que j'ai raison de me servir de ces trois différences, être lumineux, être transparent, & être opaque, ou obscur, qui sont les principales qu'on puisse rapporter au sens de la vue, pour les trois Éléments de ce Monde Visible.

Les parties rondes de la matière constituant le deuxième élément « *ne sauraient se joindre si étroitement ensemble, qu'elles ne laissent plusieurs petits intervalles entre elles* », et il faut donc, pour qu'il n'y ait aucun espace vide, que ces intervalles soient remplis par des particules plus petites susceptibles de « *changer de figure à tous moments, pour s'accommoder à celles des lieux où elles entrent* ». Ces petites particules, qui constituent le premier élément, sont formées des angles des parties initialement cubiques de la matière arrachées à celles-ci du fait du frottement incessant des particules entre elles. Les parties du premier élément formées par érosion progressive des parties initiales sont de petites tailles et « *innombrables* », n'ayant « *aucune grosseur ni figure déterminée* », et sont beaucoup plus mobiles du fait de leur légèreté, que les particules des deuxième et troisième éléments.

Les tourbillons voisins ne présentent pas des orientations relatives quelconques. En particulier, l'article 67 des Principes énonce que deux tourbillons voisins ne peuvent être alignés, c'est-à-dire se toucher par leurs pôles, sans quoi, soit ils se joindraient dans le cas où il tournent dans le même sens, soit ils se contrarieraient s'ils tournent en sens inverse l'un de l'autre. La conséquence en est que « *chaque tourbillon a ses Pôles plus éloignés des Pôles de ceux qui sont les plus proches de lui, que de leurs Écliptiques* ». Par ailleurs, l'article 68 stipule que si des tourbillons sont de tailles inégales, la contrainte de vitesses similaires à la jonction de deux tourbillons implique que « *les parties éloignées des Pôles des uns, touchent les autres aux endroits qui sont proches de leurs Pôles* ». L'article 69 énonce en conséquence que « *la matière du premier Élément sort sans cesse de chacun de ces tourbillons, par les endroits qui sont les plus éloignés de leurs pôles, & qu'il en entre aussi d'autre sans cesse par les endroits qui en sont les plus proches.* ». Le fait que la matière sorte plutôt au voisinage de l'écliptique du tourbillon s'explique par la force centrifuge s'exerçant sur la matière du tourbillon qui tend à l'éloigner, là où elle est la plus intense. Le principe de la circulation de matière entre les tourbillons implique dès lors que celle-ci entre dans un tourbillon par ses régions polaires, qui se trouvent plutôt en vis-à-vis des régions des tourbillons voisins éloignés de leurs pôles.

Lors de la formation d'une planète, lorsqu'une croûte solide apparaît et se développe à la surface d'un astre situé au centre de son tourbillon, la matière du premier élément qui entre par le pôle de ce tourbillon va, du fait de sa subtilité et de sa vitesse, circuler dans les pores de cette croûte en cours de solidification, et creuser des canaux parfaitement ajustés à la figure de ses parties, appelées par Descartes « *parties cannelées* ». L'article 133 des Principes explique :

[...] Et appliquant ici à la Terre, tout ce qui a été dit [...], pensons qu'il y a en sa moyenne Région plusieurs pores, ou petits conduits, parallèles à son essieu, par où les parties Cannelées passent librement d'un pôle vers l'autre ; Et que ces conduits sont tellement creusés, & ajustés à la figure de ces parties Cannelées, que ceux qui reçoivent les parties qui viennent du pôle Austral, ne sauraient recevoir celles qui viennent du pôle Boréal ; & que réciproquement les conduits qui reçoivent les parties qui viennent du Pôle Septentrional, ne sont pas propres à recevoir celles qui viennent du Pôle Austral, à cause qu'elles sont tournées à vis tout au rebours les unes des autres. Pensons aussi que ces parties Cannelées peuvent bien entrer par un côté dans les pores qui sont propres à les recevoir ; mais qu'elles ne peuvent pas retourner par l'autre côté des mêmes pores ; à cause qu'il y a certains petits poils, ou certaines branchettes déliées, qui avancent tellement dans les replis de ces conduits, qu'elles n'empêchent aucunement le cours des parties Cannelées, quand elles y viennent par le côté qu'elles ont coutume d'y entrer ; mais qui se rebroussent, & redressent quelque peu leurs extrémités, lorsque ces parties Cannelées se présentent pour y entrer par l'autre côté, & ainsi leur bouchent le passage, [...]. C'est pourquoi après qu'elles ont traversé toute la Terre, d'une moitié à l'autre, suivant des lignes parallèles à son essieu, il y en a plusieurs qui retournent par l'air d'alentour, vers la même moitié par où elles étaient entrées, & passant ainsi réciproquement de la Terre dans l'air, & de l'air dans la Terre, y composent une espèce de Tourbillon [...].

Ce double système directif de conformation interne des canaux suivant un système de vis et d'écrous spécifiques aux parties cannelées circulant du nord au sud et du sud au nord, et de poils couchés dans une direction dans chacun des canaux et s'opposant à la circulation de la matière en sens inverse, est à la base du système à deux courants contraires imaginé par Descartes. Dans ce système, la matière du premier élément entrant par un pôle du tourbillon traverse la terre, puis freinée et défléchie par la matière du second élément formant l'atmosphère, circule vers le pôle opposé. Une partie de cette matière est perdue, soit qu'elle se défait, soit qu'elle s'écoule dans le ciel et s'échappe du tourbillon au voisinage de son écliptique, ainsi que l'explique l'article 108. Mais la plus grande partie revient au pôle opposé et circule à nouveau dans les canaux déjà empruntés une première fois, et ainsi de suite, formant un tourbillon autour de la terre. Il y a donc ainsi, se superposant au flux de matière nouvelle entrant continument par le pôle du tourbillon, et s'échappant in fine par l'écliptique, un circuit

en boucle fermée de la matière passant par le centre de la Terre, et revenant par sa périphérie un grand nombre de fois.

Le système du « *double courant* » est inhérent au système cosmogonique de Descartes, la matière du premier élément devant, pour des raisons de symétrie et d'équilibre, entrer autant par un pôle du tourbillon que par l'autre. Il en va, ainsi que l'écrit Descartes dans l'article 141 des Principes, de la stabilité de la planète qui se trouve au centre du tourbillon. Une cause qui peut « *quelque peu détourner çà ou là cette planète* » est que :

[...] la matière du premier Élément coulant sans cesse de quelques-uns des Tourbillons voisins, vers le centre de celui que nous nommons notre Ciel, & retournant de là vers quelques autres, pousse diversement cette Planète, selon les divers endroits où elle se trouve.

De plus, les pores ou petits passages que les parties Cannelées de ce premier Élément se sont faits dans cette Planète, ainsi qu'il a été dit ci-dessus, peuvent être plus disposées à recevoir celles de ces parties Cannelées qui viennent de certains endroits du Ciel, qu'à recevoir celles qui viennent des autres ; ce qui fait que les Pôles de la Planète se doivent tourner vers ces endroits-là.

Ainsi, les jets de matière traversant la planète de pôle à pôle sont-ils susceptibles de pousser cette planète en dehors de sa position d'équilibre, et également de la faire tourner sur son axe. Reprenant la conception de William Gilbert de la Terre vue comme un grand aimant, Descartes établit une analogie entre la Terre et l'aimant, considéré comme une Terre miniature. La disposition de la limaille de fer autour de l'aimant illustre parfaitement l'idée du tourbillon, et cette analogie est une pierre angulaire du système de Descartes, qui considère que la matière magnétique circule dans les deux sens à l'intérieur de l'aimant, et de la Terre, et revient par sa périphérie pour former deux tourbillons identiques de sens opposés.

Dans le système mécaniste de Descartes, l'attraction à distance ne peut exister, et celui-ci explique l'attraction entre pôles austral et boréal (par analogie avec la terre) de deux aimants par l'action mécanique de la poussée de l'air déplacé par la matière magnétique. Pour lui, ainsi qu'il l'explique dans son article 153, la matière magnétique traversant l'aimant est accélérée par la matière du premier élément auquel elle est mélangée, et continue un certain temps en ligne droite en sortant de l'aimant, avant d'être freinée et défléchie par l'atmosphère. Ce frottement va se traduire par un déplacement de l'air qui se trouve entre les aimants, celui-ci venant, pour éviter qu'un vide se crée, se placer derrière les aimants et les poussant l'un vers l'autre. Dans le cas où ce sont des pôles de même nature qui se trouvent en vis-à-vis, la matière

magnétique sortant de l'un des aimants ne peut entrer dans l'autre, car arrêtée par les poils couchés en sens contraire, et il se maintient un espace entre les aimants pour permettre à la matière magnétique sortant des deux aimants de s'échapper vers l'atmosphère et les contourner, d'où l'effet répulsif quand on tente de les joindre. Dans le cas d'un morceau de fer, initialement non magnétisé, la matière magnétique émise par l'aimant pénètre dans le fer, et y creuse des canaux, couchant les petits poils dans le sens de sa circulation, ce qui explique que le fer se magnétise en présence de l'aimant. Pour des raisons similaires, une aiguille magnétisée placée sur un pivot au voisinage d'un aimant s'aligne avec l'axe des pôles de cet aimant et présente à un pôle de l'aimant son pôle de nature opposée.

A la même époque, Gassendi développe une conception radicalement différente, d'inspiration atomiste, dans laquelle le principe actif est celui de l'attraction, par laquelle il explique la répulsion, à l'inverse de Descartes. Ainsi, Gassendi pose-t-il dans son « *De Motu* » (1642) la question : « *comment se peut-il faire [...], que le Pôle Septentrional d'un Aimant non seulement n'attire pas le Septentrional d'un autre Aimant, mais même qu'il le repousse ?* », à laquelle il répond que « *le Pôle Septentrional ne semble pas être effectivement repoussé, mais que c'est l'Attraction du Méridional qui se sent* ». Dans le même traité, il établit un parallèle entre la pesanteur et l'attraction magnétique, dont il se sert pour émettre l'idée que la pesanteur n'est pas une qualité intrinsèque au corps qui la subit, mais qu'elle lui est imprimée de l'extérieur par la Terre qui le tire vers lui, contrairement à Descartes, qui pense que la pesanteur provient de la force de répulsion exercée sur un corps par la matière subtile du tourbillon terrestre. Gassendi se dit persuadé, tout comme Descartes et Gilbert avant lui, « *que le corps même de la Terre [...] n'est autre chose qu'un grand Aimant, & que l'Aimant qu'on tire des Mines n'est autre chose qu'une petite Terre qui provient de la véritable & légitime substance de la Terre* ». Il assimile clairement les deux actions, pesanteur et attraction magnétique, sans aller cependant dans le *De Motu* jusqu'à affirmer qu'elles sont identiques, pas que Gilbert avait franchi cinquante ans plus tôt en affirmant le magnétisme comme principe moteur de la cohésion et de la rotation de la terre sur elle-même, et plus généralement de la vie :

[...] ; de même aussi, quand vous voyez un Aimant coupé en plusieurs morceaux, & qu'il y a dans chaque morceau des pôles, un axe, un équateur, & les autres choses qui sont dans tout l'Aimant, & même dans toute la Terre ; rien ne vous peut empêcher d'inférer que ces morceaux, & l'Aimant même, & toute la Terre, soient d'une même nature, & qu'il y a une certaine forme, ou Âme qui est en quelque sorte toute dans toute la Terre qui est ce grand Aimant, & toute dans chacune de ses particules. Ce

que je dis par avance, afin que vous compreniez que si la nature de la Terre est la même que celle de l'Aimant, la force attractrice de l'une & de l'autre peut être la même, ou que si elle n'est pas la même, l'on peut dire au moins qu'elle lui est analogue, ou semblable.

On retrouve quelques années plus tard un questionnement de ce type chez Newton, qui cite plusieurs fois dans ses Principes la force magnétique par comparaison à la force de gravité, en remarquant que, comme pour la gravité, la force magnétique décroît avec la distance et, à vertu magnétique identique, croît avec la grandeur de l'aimant. Mais Newton pense que la force magnétique décroît comme le cube de la distance :

Cor. 5. La force de la gravité est d'un autre genre que la force magnétique. Car l'attraction magnétique n'est point comme la quantité de matière attirée. Certains corps sont plus attirés par l'aimant, d'autres moins : & plusieurs ne le sont point du tout. La Force magnétique d'un même corps peut être augmentée ou diminuée, elle est quelquefois beaucoup plus grande par rapport à la quantité de matière que la Force de la gravité, elle ne décroît point en s'éloignant de l'aimant en raison doublée de la distance, mais presque en raison triplée, autant que je l'ai pu déterminer par des expériences assez grossières.

Il ne peut ainsi étendre ses lois de la gravitation au magnétisme. Ricker (2011) montre que Newton, non sans réticence, accepte la théorie cartésienne de l'explication mécanique de l'attraction de l'aimant, par opposition à la gravité qu'il suppose s'exercer à distance. Il faudra attendre les travaux de Coulomb, à la toute fin du XVIII^{ème} siècle, pour que la loi de variation comme l'inverse du carré des distance de la force magnétique soit établie.

Pour revenir à Gassendi, dans un autre texte intitulé « *Des Pierres, & des Métaux* », publié en 1649 dans son *Syntagma Philosophicum*, repris et commenté par Bernier (1678), il va plus loin que dans le *De Motu* et assimile explicitement la force de cohésion de la terre à l'action magnétique via un système de « *fibres internes qui tendent du Midi au Septentrion, ou du Septentrion au Midi* » :

Ce qui s'infère de l'analogie avec l'Aimant, & les corps Magnétiques qui ont cela même de la Terre ; & il semble que c'est de là que tout le Globe de la Terre tire sa consistance, & que ses parties se tiennent fermement & mutuellement adhérentes, à cause de la jonction ou adhérence mutuelle, énergie, direction, & verticité de fibres, dont chaque partie Australe est magnétiquement ou inséparablement jointe à une Septentrionale, & chaque Septentrionale à une Australe.

Gassendi justifie l'action du grand aimant terrestre sur la pierre d'aimant par l'action des rayons magnétiques émis par la terre sur cet aimant, soit qu'elles y excitent « *quelque espèce d'Âme, & de vie, ou, [...] quelque espèce d'Instinct, & de connaissance pour ce qui est absolument nécessaire à sa conservation, tel qu'est le retour de ses parties à leur Tout* », soit « *pour l'attirer comme par force à ce Tout par le moyen de ses rayons magnétiques, comme par autant de petits crocs, de petits bras, ou des petites mains insensibles* ». Dans cette deuxième hypothèse, il imagine que les rayons magnétiques émis par la Terre, pénétrant dans l'aimant, sont soumis comme les rayons lumineux à la réfraction, qui incline et disperse leurs trajectoires autour de l'axe d'incidence et leur permet de venir efficacement crocheter les atomes pour les ramener vers la terre. Concernant l'attraction du fer par l'aimant, il avance l'idée de particules dans le fer qui sous l'action de l'aimant s'orientent et se disposent différemment (1649) :

[...] il semble qu'il faut que par la vertu de la Terre qui lui [le fer] a été transmise, ses particules les plus petites & imperceptibles au sens, soient de même manière séparées, rassemblées, tournées & fléchies, & qu'elles prennent une autre situation & une autre direction locale, selon laquelle elles tendent vers un autre endroit qu'elles ne faisaient.

Une marque convaincante de ceci est, qu'une verge de fer qui est toute brûlante & ardente prend plus aisément cette direction ou habitude à se tourner ; comme si les corpuscules de fer dans cette raréfaction qui se fait par le feu étaient plus libres, & se pouvaient plus aisément ajuster & disposer au gré de cette vertu disposante.

Ainsi, Gassendi, comme Descartes, suppose-t-il « *qu'il s'écoule continuellement de certains corpuscules tant de l'Aimant que du fer, & qu'il y a un rapport mutuel entre les pores de l'un, & les corpuscules qui sortent de l'autre d'où il arrive, [...]* », le premier dans la lignée d'Empédocle, Démocrite et Épicure, le second plutôt dans celle de Platon, qui déjà faisait l'hypothèse que l'air déplacé exerce une poussée sur les aimants et les rapproche. Mais la conception de Gassendi est plus simple, plus directement inspirée de celle de Gilbert, et ne fait aucunement l'hypothèse des tourbillons magnétiques, dans lesquels Descartes voit l'illustration particulière, et la preuve, de son système du monde. En particulier, on ne retrouve pas chez Gassendi le principe du double courant, alors que celui-ci constitue pour les cartésiens une évidence qu'on ne saurait remettre en question, comme l'exprime par exemple Régis dans son essai sur l'aimant de 1691 :

Ainsi par exemple, nous n'aurons point d'égard à l'hypothèse de ceux qui disent que la matière magnétique ne vient que d'un Pôle de la Terre, parce qu'ils manquent à dire la raison pour laquelle elle ne vient pas de l'autre.

Rohault, dans son traité de physique de 1671, se range à la même opinion, bien que se montrant moins affirmatif dans un premier temps :

S'il nous est libre de feindre cette matière subtile, il ne nous est pas libre de lui attribuer tel mouvement qu'il nous plait ; La situation que prennent les pierres d'aimant, & les aiguilles aimantées qui en sont frottées, lesquelles se disposent du Nord au Sud, nous oblige de reconnaître que cette matière se porte du Nord au Sud, ou du Sud au Nord, ou peut-être même de ces deux manières.

Dans son essai sur le magnétisme de 1680, Huygens s'interroge sur l'hypothèse du double courant de Descartes, en notant son irréalisme, notamment parce que les flux opposés des deux tourbillons à l'extérieur de l'aimant devraient entrer en collision et se neutraliser mutuellement. Il écrit, à propos de Descartes « *que je ne doute pas qu'il n'ait d'abord eu la pensée de la circulation en un sens, mais qu'il l'aura quittée la croyant insuffisante pour l'explication de quelques phénomènes que nous verrons dans la suite* ». Mais ce « phénomène » n'est pas mentionné dans la suite du traité. On ne trouve pas dans les Principes de discussion explicite de l'hypothèse du double courant relativement à celle d'une circulation dans un seul sens. Outre la raison cosmogonique précédemment évoquée, on peut néanmoins trouver une justification implicite de la nécessité, ou tout au moins de l'utilité, du double courant dans l'explication que fournit Descartes dans l'article 173 de la raison pour laquelle « *bien que les deux Pôles d'un même Aimant aient des vertus toutes contraires, en ce qui est de se tourner vers le Sud & vers le Nord, ils s'accordent néanmoins & s'entraident en ce qui est de soutenir le fer* ». Il donne l'exemple d'un aimant armé à ses deux pôles, c'est-à-dire équipé à ses extrémités de deux plaques (ou armures) métalliques enserrant les pôles, auquel on fait porter une barre de fer horizontale placée au contact des deux armures. Il explique que l'aimant peut soutenir ainsi deux fois plus de fer que si la barre ne touchait qu'une seule des deux armures. En effet, pour lui, les parties cannelées sortant de l'une des armures A de l'aimant s'écoulent dans la barre de fer depuis cette armure jusqu'à l'armure opposée B, ouvrant donc les voies qui vont rendre le fer magnétique et l'attacher à l'armure A, les parties cannelées sortant de l'armure B, et donc circulant en sens inverse, ouvrant des voies opposées qui vont l'attacher à l'armure B. L'idée sous-jacente est que l'attraction du fer par l'aimant provient du flux de matière magnétique s'écoulant de l'aimant dans le fer, et que les flux des tourbillons contraires jouent un rôle

symétrique, en attachant la partie de la barre de fer qui se trouve le plus près du pôle de l'aimant d'où sort la matière magnétique, à ce pôle.

2.2 Les connaissances sur le magnétisme au tournant du XVIII^{ème} siècle

Le physicien anglais Robert Boyle mène dès la fin des années 1650 des expériences sur le magnétisme. Dans son essai *The mechanical production of magnetism*, il s'attache à démontrer que la vertu magnétique est introduite dans les corps par des changements mécaniques de constitution. Il constate, comme d'autres avant lui, qu'un aimant chauffé perd sa vertu d'attirer le fer, bien que conservant sa forme substantielle. Il suppose l'existence d'effluves magnétiques provenant du globe terrestre pour expliquer qu'une barre de fer restée longtemps en position verticale acquiert une aimantation :

De même, on observe que les barreaux de fer des fenêtres, après être restés très longtemps en position verticale, peuvent devenir magnétiques ; ainsi, si vous appliquez la pointe nord d'une aiguille sur le bas du barreau, celui-ci la repoussera et attirera le sud ; et si vous élevez l'aiguille magnétique jusqu'à la partie supérieure de la barre, et que vous l'appliquez comme auparavant, celle-ci attirera le nord, que l'autre extrémité de la barre repoussait ; probablement, parce que la barre est, au cours du temps, de par l'action continue de l'effluve magnétique émanant du globe terrestre, transformée en une sorte d'aimant, dont l'extrémité inférieure devient le pôle nord de celle-ci, et l'autre le sud.

Il constate que si la barre ne reste pas longtemps verticale, ses pôles s'inversent quand on la retourne, et que, si elle est chauffée avant d'être mise en position verticale, elle s'aimante davantage. Il montre qu'un aimant préalablement chauffé, puis refroidi en position verticale, ou en position horizontale suivant une orientation nord-sud, peut acquérir de nouveaux pôles. Des coups de marteaux imprimés à une barre de fer préalablement chauffée et placée en position verticale, peuvent, soit en augmenter l'aimantation s'ils sont appliqués aux extrémités, soit au contraire la supprimer si la barre est frappée en son milieu. On peut lire, à propos des expériences de Boyle, l'opinion suivante à l'entrée MAGNET du Lexicon (1704) :

M. Boyle a découvert qu'en passant le dos d'un couteau, ou d'un long morceau de fil d'acier, sur le pôle d'une pierre d'aimant, tranquillement, une fois ou plusieurs fois, et en opérant le mouvement de l'équateur, ou du milieu de la pierre, vers le pôle, le couteau ou le fil attirera ensuite l'extrémité d'une aiguille magnétique ; mais si vous prenez un autre couteau ou fil de fer, et le passez tranquillement au-dessus du pôle de l'aimant, en opérant cette fois du pôle vers l'équateur ou le milieu de l'équateur,

ce couteau expulsera ou repoussera la même extrémité de l'aiguille, que le premier couteau attirait : Cette expérience rend très probable le fait que le fonctionnement de l'aimant dépend du flux de certaines particules fines qui sortent d'un pôle, puis tournent autour et rentrent à nouveau par l'autre pôle.

Ainsi, les conclusions de Boyle favorisent-elles la conception de Descartes de tourbillons magnétiques autour des aimants, sans que soit précisé si la circulation se fait dans un seul sens, ou dans les deux.

Un apport majeur de Boyle est d'avoir utilisé sa pompe à vide, mise au point pour étudier l'élasticité de l'air, pour tester la théorie cartésienne de l'attraction du fer par l'aimant, qui fait appel à l'air expulsé par la matière magnétique pour expliquer le rapprochement de l'aimant et du fer sous la poussée de l'air déplacé. En 1659, Boyle et Hooke placent une aiguille aimantée dans une enceinte où ils ont fait le vide et constatent qu'elle se comporte « *selon les lois magnétiques, sans différence notable par rapport à ce qu'aurait fait la même pierre d'aimant si l'air n'avait pas été aspiré autour de l'aiguille* » (« *New Experiments Physico-Mechanical, Touching the Spring of the Air, and its Effects* », 1660). Dix ans plus tard, plaçant un aimant et, au-dessous, un morceau de fer suspendu à lui par l'action magnétique, dans une enceinte, ils constatent que l'extraction de l'air hors de l'enceinte n'affecte en rien la vertu magnétique de l'aimant et du fer. Boyle teste également l'attraction de deux aimants placés dans l'eau, donc en l'absence d'air, et ne note aucune différence sensible. Ces expériences vont amener les successeurs de Descartes à améliorer sa théorie de l'aimant, de manière à se passer de l'air comme substrat mécanique intermédiaire pour le rapprochement des aimants.

Christiaan Huygens, dans son essai sur le magnétisme lu en mai et juin 1680 à l'Académie des Sciences, propose une théorie qui, bien que ne remettant pas en cause les fondements de l'approche cartésienne, s'en distingue sur plusieurs points. Tout d'abord, Huygens nie la réalité du double courant imaginé par Descartes sur la base de son système du monde, ce qui lui permet de faire l'économie du système sophistiqué de vis et d'écrous imaginé par ce dernier :

Il paraît par ce que je viens de dire que je ne fais circuler la matière magnétique à travers l'aimant que d'un seul sens étant contre toute apparence de raison qu'elle puisse couler par deux mouvements contraires comme l'a supposé M^r. Descartes car quand cela se pourrait faire ainsi en dedans de l'aimant, en supposant des canaux tournés en vis droites et gauches, ou hérissés en des sens contraires, il arriverait toujours que les particules étant sorties hors de la pierre, se heurteraient et empêcheraient

ainsi leurs tourbillons contraires. Pour ne rien dire de la difficulté, ou même de l'impossibilité de la génération des canaux et parties cannelées de la manière qu'il a voulu l'expliquer.

Ensuite, la matière des tourbillons de l'aimant, que le fer est la seule substance à absorber, doit être moins subtile que celle qui est responsable de la pesanteur, qu'aucune matière connue n'intercepte. Elle est par contre plus subtile que la matière éthérée qui sert à la propagation de la lumière, du fait que de nombreux corps sont opaques, et absorbent de ce fait la lumière. Autant dans l'air, à l'extérieur de l'aimant, la matière magnétique, particulièrement légère et rapide, se meut en tous sens, autant elle se meut dans un seul sens dans les pores, jugés « *droits* », de l'aimant, couchant des « *particules oblongues* » qu'on peut assimiler aux « *petits poils* » introduits par Descartes, ne permettant qu'une circulation dans un seul sens. Par contre, l'éther dans lequel se propage la lumière, dont les corpuscules sont plus gros que ceux de la matière magnétique, ne circule pas dans les pores avec la matière magnétique. Dans ce système, l'air et l'éther qui entourent l'aimant résistent à la matière magnétique sortant de l'aimant, qui est défléchie et forme le tourbillon cartésien, limité à un seul sens de circulation, celui-ci n'étant pas spécifié par Huygens. Concernant l'attraction de l'aimant, Huygens invoque l'effet de la pesanteur de la matière éthérée, au lieu de celui de l'air, et plutôt qu'une poussée directe de cette matière éthérée sur les aimants, fait appel à la notion de volume des deux tourbillons mêlés, que la pesanteur de la matière éthérée, associée à une matière plus subtile que la matière magnétique, tend à rendre le plus petit possible en le comprimant :

Il faut noter au reste qu'il y a grande différence entre ma manière d'expliquer l'attraction de l'aimant et celle de Descartes, qui veut que le flux de la matière magnétique chasse l'air d'entre les 2 aimants pour faciliter son cours, et que tout étant plein dans le monde cet air pour trouver où se mettre pousse les 2 aimants par leurs côtés éloignés à se rapprocher. Car premièrement je ne suppose point la plénitude absolue du monde, et même je la tiens impossible tous les petits corpuscules de la matière la plus subtile même selon M. Descartes étant de figure irrégulière et en mouvement. Je dis de plus que ce n'est pas l'air mais une matière bien plus subtile que l'air qui est chassée par la matière magnétique puisque dans des vaisseaux vides d'air les aimants s'attirent de même. Et enfin je tiens que c'est la pesanteur de cette matière subtile qui oblige le tourbillon de 2 aimants à se réduire à moins d'étendue et moins de matière, par l'approche de l'un et de l'autre.

Huygens considère la terre comme un grand aimant « *fort faible* », sans faire appel, concernant la terre, aux particules se hérissant dans les pores de l'aimant, car il considère que si la matière circule dans un sens, elle n'a aucune raison de s'arrêter, continuant sa route pour longtemps.

On peut se demander si Huygens ne fournit pas, sans le dire, la raison pour laquelle il avait précédemment noté que Descartes avait pu avoir tout d'abord l'idée d'une circulation dans un seul sens, mais en était finalement venu au double courant. Dans le système de Descartes, qui suppose que la matière magnétique agit sur l'air en le repoussant, un objet placé au voisinage d'un aimant, soumis aux pressions contraires des deux courants de matière magnétique, reste immobile, ainsi que le confirme l'expérience. Mais dans l'hypothèse d'un seul courant, nous dit Huygens : « *un morceau de fer ou même tout autre corps léger se trouvant dans le tourbillon d'un aimant, et avec la liberté de se pouvoir mouvoir, [devrait être] emporté du côté que coule la matière du tourbillon, puisqu'elle va toute d'un côté, de même que l'air ou l'eau courante emporte les corps qui nagent dedans* ». La réponse de Huygens à cette objection, qui est majeure, et sera reprise par de nombreux tenants de l'hypothèse du double courant, est la suivante :

[...] je répons que la matière magnétique n'est pas la seule qui entoure ce petit aimant ou morceau de fer, mais qu'il y a outre cela une matière éthérée et celle de l'air que je conçois composées de parties incomparablement plus grosses que la matière magnétique, laquelle ne fait que les traverser, et couler par leurs interstices sans avoir la force de les chasser de leur place ; et ainsi ce morceau de fer ou de bois est retenu dans la place par les corpuscules qui l'entourent, lesquels sont poussés avec même force que ce corps et auraient la même raison d'être emportés.

Mais l'action de la matière magnétique peut donner à une aiguille qui nage sur l'eau la direction convenable et particulière pour cette aiguille sans pouvoir rien faire sur les corpuscules de l'eau, et autres qui l'entourent.

Ainsi, l'objection, incontournable dans le système de Descartes qui suppose une action mécanique de la matière magnétique sur l'air, est levée du fait de l'extrême subtilité proposée par Huygens pour la matière magnétique, qui coule dans les intervalles de la matière éthérée et de l'air, concourant tous deux à maintenir les corps placés en leur sein immobiles.

Les connaissances dans le magnétisme terrestre se développent rapidement dès le XVI^{ème} siècle, du fait de ses applications à la navigation. Si les pôles nord et sud magnétiques de la Terre étaient alignés avec son axe de rotation, l'aiguille de la boussole fournirait le nord. En réalité, l'aiguille s'écarte du méridien vrai d'un angle appelé déclinaison, donc on sait déjà à l'époque qu'il varie en fonction de la position sur le globe, mais également du temps. On peut lire à l'entrée AIGUILLE AIMANTÉE de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert que la

déclinaison a été identifiée et mesurée dès le XIII^{ème} siècle, et fréquemment mesurée dans les siècles suivants. C'est cette existence de la déclinaison de l'aiguille aimantée, notamment, qui amène Gilbert, dans son traité publié en 1600, à remettre en question les travaux de Peregrinus qui, au XIII^{ème} siècle, a imaginé que le pouvoir d'alignement des corps magnétiques provient des cieux. Pour Gilbert, qui est également au fait de l'inclinaison de l'aiguille aimantée, à savoir sa propension à pointer vers le bas si on ne la contraint pas à rester horizontale, propriété découverte au XVI^{ème} siècle par Normann, puis Hartmann (Ricker III, 2011), l'action magnétique vient de la Terre, qu'il considère comme un aimant géant. En 1683, Edmond Halley publie dans les *Philosophical Transactions* un article recensant les données de l'époque sur les variations spatiales et temporelles de la déclinaison, et une méthode pour essayer de trouver les lois générales qui les régissent. Les observations dont il dispose portent sur l'Europe, l'océan indien, l'Amérique, et couvrent à peu près un siècle de mesures. En premier lieu, elles lui permettent de contredire certaines conclusions tirées par Gilbert et Descartes. L'idée de Gilbert suivant laquelle, la terre étant magnétique et l'eau non magnétique, l'aiguille aimantée devrait pointer vers les continents, ne se vérifie pas au large du Brésil. L'hypothèse de Descartes suivant laquelle la déclinaison de l'aiguille serait liée à la présence, localement (comme à l'île d'Elbe), de mines de fer, est infirmée par l'observation de variations cohérentes de très grande échelle, sur plusieurs milliers de kilomètres, de la déclinaison dans l'océan indien. De telles variations nécessiteraient d'énormes quantités de minerai, que Halley juge irréalistes. Halley analyse les données et propose l'existence de quatre pôles magnétiques sur la Terre (dont le plus proche de nous se trouve sur le méridien de l'Angleterre, à 7° du pôle nord) :

L'ensemble du globe terrestre est un grand aimant, ayant quatre pôles magnétiques, ou points d'attraction, deux étant proches de chaque pôle de l'équateur ; et ceci que, dans ces parties du monde, qui se trouvent à proximité de l'un de ces pôles magnétiques, l'aiguille est gouvernée par celui-ci, le pôle le plus proche étant toujours prédominant sur le plus éloigné.

Halley revient sur cette question dans un article des *Philosophical Transactions* publié en 1692, en tentant de fournir une explication, d'une part au fait que les aimants connus n'ont que deux pôles alors que la Terre en aurait quatre suivant son analyse, d'autre part à la dérive temporelle des pôles, qui présente au cours du siècle écoulé une tendance générale vers l'ouest. Il imagine que la cause de ce mouvement est l'existence d'une partie mobile à l'intérieur de la terre. Cette idée ne sort pas de nulle part, puisque dans le système cartésien, la terre magnétique est une terre intérieure, recouverte d'une écorce de grande épaisseur qui nous porte, comme l'explique

en détail Rohault dans son traité de 1671. Ainsi, la matière magnétique qui émerge du pôle sortant revient-elle vers le pôle entrant à la fois par l'atmosphère et par la croûte non magnétique surmontant la terre intérieure. Mais Halley dit ne pouvoir raisonnablement imaginer qu'une partie du globe au contact de la croûte puisse se mouvoir à l'intérieur, car cela devrait entraîner des changements de centre de gravité et d'axe de rotation, et modifier la forme de la surface de la mer. Il émet donc l'hypothèse que la terre intérieure, qu'il appelle le cœur, tourne autour du centre de la Terre, et qu'elle est détachée de ses parties externes, qu'il désigne sous le nom d'enveloppe, et se meut librement et sans frottement :

Ainsi, les parties externes du globe peuvent être considérées comme l'enveloppe, et les parties internes comme le noyau, ou le globe intérieur, contenu dans le nôtre, avec un milieu fluide entre les deux. Ayant le même centre et le même axe de rotation diurne, le noyau peut tourner avec notre Terre toutes les 24 heures. Mais que l'enveloppe ait un mouvement un peu plus rapide, ou un peu plus lent, que celui du noyau, la plus infime différence, se répétant un grand nombre de fois, deviendra sensible ; les parties internes s'éloigneront des parties externes par degrés, et ne tournant pas, les unes et les autres, au même rythme, apparaîtront graduellement décalées vers l'Est ou vers l'Ouest de par la différence de leurs vitesses de rotation.

Il résout ainsi les deux difficultés précédemment citées. Les deux pôles de l'enveloppe ne sont pas confondus avec les deux pôles du noyau, formant au total quatre pôles distincts. Les pôles de l'enveloppe sont fixes, tandis que ceux du noyau, qui tourne à une vitesse angulaire légèrement plus faible que celle de la coquille, dérivent peu à peu. Ceci est dû au léger retard avec lequel l'enveloppe communique son mouvement au noyau. Après une certaine période de temps, le système revient à un même état magnétique, et ainsi de suite. Halley est conscient des objections qui seront faites à son système :

Mais pour revenir à notre hypothèse, qui, pour expliquer les variations de la déclinaison, suppose la Terre creuse et contenant un autre Globe, je ne doute pas qu'elle rencontre de nombreuses oppositions. Je sais qu'on objectera qu'il n'y a pas d'exemple dans la nature d'une chose semblable, que s'il y avait un tel globe intermédiaire, il ne conserverait pas sa place au centre, mais serait susceptible de s'en écarter, et pourrait éventuellement venir heurter l'enveloppe concave, la mettant en ruine ou, au minimum, la fragilisant ; Que l'eau de la mer s'écoulerait perpétuellement à travers le fond de l'enveloppe, à moins que nous ne supposions que la cavité soit pleine d'eau ; Que si cela était possible, il ne semble pas qu'une telle sphère intérieure puisse être d'une quelconque utilité, étant enfermée dans les ténèbres éternelles, et donc impropre à la production d'animaux ou de plantes ; avec beaucoup d'autres objections, selon le sort qui sera fait à toutes ces nouvelles propositions.

Il tente de fournir des réponses à ces objections, et avance l'hypothèse que la terre intérieure pourrait abriter aussi une forme de vie, et que la surface interne de l'enveloppe pourrait être recouverte d'une matière semblable à celle du soleil, hypothèse qu'il reprendra dans son explication de l'aurore boréale, vingt ans plus tard.

Dans ses conjectures physiques publiées en 1707, Hartsoeker fournit un traité de l'aimant, en se plaçant dans l'hypothèse cartésienne, mais dans un système où la matière magnétique circule dans un seul sens, ainsi que l'avait proposé Huygens vingt ans plus tôt. Il fait l'hypothèse, arbitraire dit-il, que la matière magnétique entre par le pôle austral et sort par le pôle boréal, hypothèse que Halley reprendra dans son interprétation de l'aurore boréale dix ans plus tard. Il suppose que la matière magnétique circule dans des canaux qui ne sont disposés qu'à la recevoir, « & par conséquent qu'elle y a circulé de tout temps, & qu'elle y circulera toujours sans discontinuation ». Comme Huygens, il admet la présence d'une matière subtile distincte de l'air à l'extérieur de l'aimant, qui, de par son poids, est responsable de l'effet apparent d'attraction entre aimants. Après avoir fourni une interprétation de diverses mesures qu'il a effectuées, il s'intéresse au magnétisme terrestre et à la variation de la déclinaison, pour laquelle il reprend l'idée de Halley d'une croûte extérieure et d'une terre intérieure tournant à une vitesse légèrement différente. Il estime, comme Halley, qu'on ne dispose pas de suffisamment d'observations pour déterminer la vitesse de rotation de la terre intérieure, mais que le temps viendra où cela sera possible. Comme lui, il avance qu'il pourrait y avoir plusieurs (deux ou trois) terres intérieures emboîtées, si l'on veut expliquer parfaitement les observations. Vers la fin de son mémoire, Hartsoeker parle de cas répertoriés d'inversion des pôles de l'aiguille aimantée sous l'effet du « tonnerre » (donc la foudre), qui d'après lui sont susceptibles de fournir le sens de circulation de la matière magnétique dans l'aimant :

J'aurais été bien aise d'apprendre, comment le tonnerre était tombé ; mais je n'en pus jamais rien savoir de certain. Car s'il était tombé vis à vis des pôles boréaux de ces aiguilles, il y aurait fait tourner bout pour bout les corps magnétiques, & j'en aurais pu conclure assez sûrement que la matière magnétique sort par le pôle boréal magnétique de la Terre & rentre par son pôle austral, ce que je n'ai avancé que par conjecture & sans aucune certitude. Mais s'il était tombé vis à vis des pôles austraux de ces aiguilles, j'aurais été obligé d'en conclure au contraire, que la matière magnétique sort par le pôle austral magnétique de la Terre & rentre par son pôle boréal ; & que le tonnerre, ayant rencontré directement la matière magnétique, qui sortait par le pôle austral de ces aiguilles,

avait fait tourner bout pour bout les corps magnétiques de ces aiguilles, à peu près comme fait la matière qui sort d'un aimant, & rencontre directement celle qui sort d'une aiguille de boussole.

Il mentionne qu'une telle inversion des pôles de l'aiguille est incompatible avec le système à double courant de Descartes. Il invalide ensuite la fameuse critique, déjà évoquée plus haut, faite au système de la circulation dans un seul sens, à savoir la dérive attendue dans ce cas d'un objet placé dans le tourbillon de l'aimant, en l'occurrence, dans son exemple, une boussole flottante qui serait laissée libre à la surface de la terre. Son argument, assez similaire à celui de Huygens, bien que moins élaboré, est que la matière magnétique passe avec facilité à travers tous les corps, et ne peut les entraîner. Il propose une expérience pour mettre éventuellement en évidence la circulation dans un seul sens de la matière magnétique :

On pourrait prendre une aiguille de boussole de sept ou de huit pouces de longueur, la faire flotter sur un petit brin de bois, la diriger avec son pôle boréal vers le pôle boréal magnétique de la Terre, & l'arrêter légèrement entre quatre filets pour l'empêcher de tourner bout pour bout. Si elle demeurait en place, cela ne conclurait encore rien ni pour ni contre mon Système, à cause que le courant de la matière magnétique de la Terre est si faible, principalement vers l'Équateur magnétique de la Terre, parce que c'est là où la matière magnétique est en très petite quantité, qu'il pourrait être incapable de pousser seulement tant soit peu cette aiguille ou vers l'un ou vers l'autre pôle. Mais si cette aiguille était poussée vers le pôle Austral de la Terre, j'en pourrais conjecturer, que la matière magnétique ne sort du pôle boréal magnétique de la Terre que pour rentrer par son pôle austral ; & au contraire.

Dans cette expérience, c'est parce que la matière magnétique de la Terre ne peut traverser l'aiguille, contrainte à demeurer orientée dans un sens qui ne permet pas la circulation de cette matière, qu'elle exerce sur elle une pression, tel un vent sur la girouette, suivant la comparaison utilisée par Hartsoeker.

On trouve dans les Mémoires pour l'histoire des Sciences et des Beaux-Arts publiés en 1703, la relation d'une correspondance entre Louis Joblot et Louis de Puget. Le sujet initial de l'échange est le rapport fait par Joblot d'une expérience en tout point semblable à celle proposée par Hartsoeker, et des conclusions qu'il en tire, auxquelles Puget, tenant du double courant, s'oppose. Joblot dispose dans un récipient rempli d'eau un tuyau horizontal rempli d'eau à mi-hauteur. Il insère dans ce tuyau, orienté du nord au sud, une aiguille dont le pôle boréal est bloqué face au pôle boréal de la Terre, la plaçant sur un support flottant qu'il insère dans le tuyau par son orifice sud, le tuyau empêchant le support de tourner sur lui-même. A l'aide d'un

aimant, l'aiguille est amenée au voisinage de l'orifice nord du tuyau, puis l'aimant est retiré. Joblot voit alors l'aiguille migrer à travers le tuyau vers son orifice sud, sortir du tuyau, puis tourner de 180° et prendre son orientation naturelle. Il en déduit que la matière magnétique circule du nord au sud, ce qui, au passage, correspond à l'hypothèse d'Hartsoeker. Puget refait l'expérience avec diverses aiguilles, certaines non aimantées, et en donnant au tuyau diverses orientations, et trouve que l'aiguille, dans tous les cas, sort par la même extrémité, celle à laquelle le tuyau, qui n'est pas rigoureusement cylindrique, est le plus large. Il conclut à un biais expérimental. Dans un deuxième échange, Joblot fait valoir que, dans l'hypothèse du double courant, deux aimants dont les pôles de même nom se font face devraient s'attirer tout autant que dans le cas contraire, ce qu'il démontre à partir d'une expérience dans laquelle les aimants sont simulés par deux morceaux de bois dans lesquels il place des écrous, et qu'il tient ensemble par des vis, et « *fait voir à l'œil que quoiqu'il y ait dans chaque bois des écrous à contresens, cependant on ne laisse pas de les joindre ensemble par le moyen des mêmes vis de quelque côté qu'on les tourne* ». Puget démonte l'argument de Joblot de façon assez peu convaincante, mais on ne peut manquer de noter que Joblot semble n'avoir pas tenu compte des « *poils* » couchés qui bloquent la circulation dans un sens. Une autre objection de Joblot est que le système d'écrous de Descartes implique que les parties de l'aimant qui les forment sont « *très raides & inflexibles* », or on constate que des lames d'acier aimantées peuvent très facilement voir leurs pôles s'inverser, pour peu que l'on passe l'aimant sur la lame dans un sens ou dans l'autre : « *comment s'imaginer qu'un corps aussi dur que l'est l'acier, puisse tant de fois changer d'écrous en si peu de temps ?* ». Dans un troisième échange, Puget oppose quatre arguments au principe de la circulation dans un seul sens :

1. *Lorsqu'on présente au pôle d'un Aimant qui flotte sur l'eau, le pôle sympathique d'un autre Aimant, celui qui flotte, au lieu de suivre l'autre, devrait s'en éloigner, parce que la matière Magnétique qui sort de l'Aimant qu'on tient à la main, trouve dans l'Aimant qui flotte sur l'eau plus de parties solides contre lesquelles elle heurte, qu'elle n'y rencontre de pores qu'elle pénètre.*
2. *La matière Magnétique de la terre doit pousser vers l'endroit où elle va tous les Aimants qu'elle trouve sur sa route, s'ils sont en liberté d'avancer vers cet endroit.*
3. *La terre même devrait pour la même raison quitter le centre de son tourbillon, & passer continuellement de tourbillon en tourbillon sans se fixer jamais.*
4. *Tous les corps qui peuvent être aisément remués devraient être pareillement emportés par le cours de la matière Magnétique.*

Anticipant l'objection aux arguments 1 et 4 selon laquelle la matière magnétique terrestre serait trop faible pour entraîner des aimants et autres objets, il réalise une expérience. Chargeant un petit « *bateau d'argent* » d'une minuscule aiguille aimantée, pesant une fraction de millième du poids du bateau, il montre que celui-ci s'aligne sur l'axe des pôles en trois quarts d'heure, ce qui lui permet de conclure à la force considérable de la matière magnétique terrestre. On a vu les réponses apportées à ces arguments par Huygens et Hartsoeker. L'argument 3, de nature cosmogonique, provient de l'article 141 des Principes de Descartes sur la stabilité des planètes, que nous avons déjà commenté. L'argument 1 dit que la matière magnétique sortant de l'aimant qu'on tient vient en partie cogner sur les parties solides de l'aimant flottant, une petite partie seulement de cette matière le traversant par ses pores, ce qui doit provoquer un effet de répulsion. On peut comprendre cet argument, mais il est difficile de comprendre pourquoi il ne vaut pas aussi dans l'hypothèse du double courant défendue par Puget.

3. L'explication de l'aurore boréale par la matière magnétique

3.1 L'aurore de 1716 et l'hypothèse de Edmond Halley

L'aurore boréale est un phénomène encore relativement peu connu au début du XVIII^{ème} siècle. Bertholon, à l'entrée AURORE BORÉALE du Dictionnaire de physique (1793), fournit une très longue analyse, historique et scientifique, du phénomène. Il cite Aristote, témoin d'une aurore en Macédoine :

Aristote compare l'aurore boréale à une flamme mêlée de fumée, à la lumière d'une lampe qui s'éteint, & à l'embrassement d'une campagne dont on brûle le chaume. Elle a principalement cette apparence, lorsqu'elle s'étend beaucoup en longueur & en largeur. Ce sont, dit-il, de ces phénomènes qui ne paraissent que pendant la nuit, & dans un temps serein. Le gouffre désigne, selon lui, le segment obscur ; il nomme tisons allumés, torches, lampes, poutres ardentes, les colonnes, les jets de lumière qu'on remarque souvent dans ce phénomène. Selon cet illustre philosophe, les couleurs le plus généralement répandues sur le phénomène, sont le pourpre, le rouge vif & la couleur de sang Liv. I^o. des météores d'Aristote, Cf chap. IV & V.

C'est au XVIII^{ème} siècle, avec le philosophe allemand Frobès, et le savant français Dortous de Mairan, que les premiers catalogues d'aurores, couvrant plus de mille ans d'histoire, sont établis. L'intérêt pour les aurores boréales à cette époque résulte de leur reprise en 1707, après

une longue période d'interruption succédant à l'aurore de 1621, dont Gassendi a été témoin. Halley, qui a été vu la grande aurore de mars 1716, en propose la première interprétation scientifique. Ainsi que nous l'avons mentionné au chapitre précédent, Halley avance une première explication en termes de vapeurs sulfureuses, assez similaire à celle qu'il donnera en 1719 pour un globe de feu qui a survolé l'Angleterre :

C'est pourquoi nous avons commencé à examiner ce qui pourrait être la cause matérielle de ces apparitions, à savoir des effluves sulfureuses de vapeur d'eau, que nos naturalistes considèrent généralement comme la cause des tremblements de terre. Et comme les tremblements de terre se produisent avec une grande incertitude, et qu'ils ont parfois été fréquents dans des endroits où, pendant de nombreuses années, avant ou après, ils n'ont pas été ressentis, on peut supposer qu'ils ont été produits par l'éruption de la vapeur d'eau à travers les pores de la Terre, lorsqu'elle n'est pas en quantité suffisante, ni assez confinée pour secouer sa surface ou pour s'ouvrir un passage en la déchirant.

Il invoque le caractère sporadique et imprévisible des aurores pour les comparer aux tremblements de Terre, qui seraient tous deux provoqués par la vapeur d'eau, chauffée à l'intérieur de la Terre, s'échappant vers l'atmosphère en emportant avec elle des vapeurs sulfureuses. Suivant que cet échappement est violent, et parvient à fracturer la croûte terrestre, ou modéré, se contentant de filtrer à travers la surface, se produiraient, soit des tremblements de terre, soit des aurores boréales. Comme pour les globes de feu, il mentionne les expériences de chauffage sous vide de poudre à canon, qui génèrent des lueurs, réalisées par Whiteside à Oxford. Dans cette période, les tenants de l'hypothèse chimique de l'inflammation de matières sulfureuses élevées dans l'atmosphère depuis la surface de la terre pour expliquer divers météores, comme l'éclair, les globes de feu, les étoiles filantes, ou les aurores, sont nombreux, tels Musschenbroek. Pour certains partisans de cette explication des aurores boréales, la matière sulfureuse pourrait s'élever d'une région septentrionale de la Terre, et l'ensevelissement de cette matière par un tremblement de terre pourrait produire des longues périodes de cessation du phénomène auroral, expliquant l'interruption observée pendant la plus grande partie du XVII^{ème} siècle (en l'occurrence le « petit âge glaciaire » durant lequel l'activité solaire a été faible).

Mais Halley doute qu'une aurore, vue à la fois d'Irlande, de Russie et de Pologne, s'étendant sur 30° de longitude et 50° de latitude sur le nord de l'Europe, puisse être liée à un tremblement de terre, nécessairement plus localisé. Il avance alors une autre hypothèse, impliquant le

fonctionnement de la Terre à l'échelle globale. Reprenant les idées de Gilbert, puis Descartes, qui ont comparé la Terre à un grand aimant, il a l'intuition du rôle du magnétisme dans l'apparition des aurores, qui lui est dicté par la localisation à haute latitude des phénomènes auroraux. Il écrit :

C'est pourquoi, abandonnant tout espoir de pouvoir expliquer ces choses par les vapeurs ou les exhalaisons ordinaires de la terre ou des eaux, nous sommes contraints d'avoir recours à d'autres sortes d'effluents, de nature beaucoup plus subtile, et qui peuvent peut-être sembler davantage propres à provoquer ces merveilleux et surprenants mouvements rapides que nous avons observés. Telles sont les Effluves magnétiques, dont les Atomes entiers pénètrent librement les Pores des Corps les plus solides, ne rencontrant aucun Obstacle de la part du Verre, ni du Marbre, ni même de l'Or lui-même. En état de perpétuelle effusion, certains d'entre eux proviennent des parties proches des pôles de l'Aimant, tandis que d'autres, du même type, mais dotés d'une tendance contraire, entrent dans une même partie de la Pierre, à travers laquelle ils passent librement ; et, par une sorte de Circulation, l'entourent de tous côtés, comme le ferait une Atmosphère, à une distance de quelques Diamètres du Corps.

Il fait explicitement référence dans son article à la théorie de Descartes de circulation de la matière magnétique à travers la Terre, mais ne suppose qu'un seul sens de circulation, conformément aux idées exposées alors récemment par Huygens, ou Hartsoeker. Il considère, comme Hartsoeker, que la matière magnétique sort par le pôle boréal de la Terre et circule dans l'éther vers son pôle austral. Halley argumente sur le fait que les aurores sont vues le plus souvent au nord-ouest (Islande, Groënland), précisément au voisinage du pôle nord magnétique de l'époque. Les jets lumineux sont identifiés à des colonnes de vapeurs magnétiques s'élevant verticalement de la surface de la Terre, et se disposant comme de la limaille de fer autour d'un aimant. Les couronnes vues au voisinage du zénith résultent de faisceaux s'élevant tout autour de l'observateur et convergeant à grande distance au-dessus de lui. Il évoque le fait que les colonnes, s'élevant jusqu'au-dessus de l'ombre de la Terre peuvent être éclairées par le soleil, comme un ciel de crépuscule. Il n'exclut pas que les vapeurs magnétiques puissent rayonner aussi de leur lumière propre.

Pour Halley, dans une vision conforme à celle de Huygens, les vapeurs magnétiques s'élèvent dans l'éther, éventuellement au-dessus de l'atmosphère. Il dit à ce sujet que les faisceaux, quand ils subsistent un certain temps, paraissent pour l'observateur lié à la Terre se mouvoir d'est en ouest. Il interprète ce mouvement apparent comme étant dû au fait que les faisceaux, une fois

sortis de l'atmosphère, voient leur mouvement d'ouest en est, lié la Terre qui les a entraînés dans sa rotation, se ralentir :

Mais ce mouvement n'était qu'optique, provoqué par le fait que l'Oeil du spectateur était emporté vers l'Est avec la Terre ; alors que la vapeur extrêmement raréfiée dont ces faisceaux étaient constitués, étant, comme je l'imagine, élevée bien au-dessus de l'atmosphère, a été, soit entièrement laissée derrière, soit n'a conservé qu'une partie de sa vitesse, ne pouvant donc que sembler reculer et prendre la direction opposée.

Il faut remarquer que la quasi-synchronicité des rotations des structures aurorales et de la Terre ne signifie pas pour Halley, sensu-stricto, que l'aurore se produit dans l'atmosphère, opinion fréquemment exprimée par les savants de l'époque. Ainsi, Maraldi (1716), le seul savant français ayant publié au sujet de l'aurore de 1716, écrit-il :

Nous nous aperçûmes que les Etoiles de la tête de Méduse & du genou de Persée se trouvèrent moins enfoncées dans cette lumière du commencement de son apparition que dans la suite ; surtout l'Etoile de Persée qui faisait en même temps plus de variation en hauteur que les autres, pendant que la lumière était également large, & passait toujours par les mêmes Etoiles proche du Méridien, qui ne variaient point sensiblement de distance à l'égard de l'horizon ; ce qui fait voir que cette lumière ne participait point au mouvement du premier mobile ; par conséquent qu'elle n'était pas céleste, mais plutôt attachée à notre Atmosphère, & qu'elle est différente de la lumière qui a été découverte sur le Zodiaque par M. Cassini, qui participe au mouvement du premier mobile, & au mouvement propre du Soleil.

Halley ne se prononce pas sur la nature de la matière composant l'effluve magnétique, notant juste, comme nous l'avons déjà noté au chapitre précédent, qu'elle peut être, soit lumineuse par elle-même, soit entrainer depuis le sous-sol terrestre des atomes propres à produire de la lumière dans l'éther, par exemple de la vapeur d'eau. Halley termine son article en reprenant brièvement son idée, publiée en 1692, de l'existence d'une Terre intérieure, un noyau, en rotation légèrement désynchronisée par rapport à l'enveloppe sur laquelle nous vivons, pour expliquer la dérive des pôles magnétiques. Il rappelle que, selon lui, cette terre intérieure est susceptible d'être habitée. Il suggère que l'espace entre le plafond concave de la croûte supérieure et la Terre intérieure pourrait abriter la matière lumineuse responsable des aurores, qui y entretiendrait ainsi un jour perpétuel sur la Terre intérieure. Cette matière s'échapperait au

voisinage des pôles car la croûte terrestre doit y être moins épaisse, la Terre étant aplatie aux pôles.

Dans son traité sur l'aurore boréale (1733), Mairan critique explicitement la théorie de Halley :

[...] je demande, comment la matière Magnétique jusqu'ici invisible, & plus subtile peut-être que la lumière même, plus capable du moins de passer librement à travers les substances les plus serrées, & telles que l'Or, devient visible, & nous réfléchit la lumière étant portée à deux ou trois cents lieues de hauteur, c'est-à-dire, infiniment au-dessus de la Région des Crépuscules? Ou si ce n'est que par le secours des matières terrestres & sulfureuses poussées vers le Pôle & à cette Région par la matière Magnétique, supposé qu'une telle impulsion soit possible de la part d'un fluide qui pénètre tout avec tant de facilité, je demande encore, comment les vapeurs & les exhalaisons terrestres perdent par ce moyen leur poids ordinaire, & montent au centuple de la hauteur où elles ont coutume de s'arrêter dans l'Atmosphère? [...] Enfin je ne vois pas comment cette Hypothèse, qui roule sur une cause permanente, pourrait s'accorder avec les cessations & les reprises de l'Aurore Boréale.

Une autre critique faite plus tard par Mairan à ce système porte sur l'argument selon lequel la déclinaison de l'aurore est voisine de celle du pôle nord magnétique, fait qu'il conteste au prétexte de la variabilité à courte échelle de temps de la déclinaison de l'aurore, qui ne peut se comparer à la variabilité à long terme de la déclinaison du pôle nord magnétique. De plus, l'hypothèse d'une terre intérieure possédant une atmosphère magnétique, faite par Halley à la fin de son article, hypothèse contre laquelle il dit lui-même s'attendre à de nombreuses oppositions, est effectivement utilisée par plusieurs commentateurs pour critiquer sa théorie. On retrouve l'ensemble de ces critiques résumées par Bertholon, à l'entrée AURORE BORÉALE de l'Encyclopédie méthodique (1819), qui s'exprime ainsi à propos de l'opinion de Halley :

Cette opinion a pu paraître un instant séduisante, parce qu'elle semblait expliquer pourquoi l'aurore boréale se montre toujours vers le nord, & en décline de quelques degrés, mais elle n'est aucunement satisfaisante, parce que, 1°. cette espèce d'organisation, si je puis parler ainsi, qu'on prête au globe terrestre est aussi composée que précaire. 2°. ... Or, on n'a point remarqué que la déclinaison de l'aurore boréale fut en rapport avec celle de l'aimant ; que la première fut vers l'est au commencement du siècle dernier, & dans les siècles précédents, lorsque l'aiguille aimantée se tournait vers cette partie du ciel, ni que ses variations eussent une marche correspondante & des périodes réglées, comme le fluide magnétique. On a vu au contraire que dans la même année & dans le même mois, l'aurore boréale était tantôt dirigée vers l'ouest, tantôt vers l'est, & quelquefois directement au pôle...

3°. L'aurore boréale devrait paraître perpétuellement, le fluide magnétique circulant sans interruption autour du globe de la terre. 4°. Ce fluide devrait être susceptible d'inflammation & de lumière; & cependant il n'a jamais été possible de produire aucune déflagration ni même la plus petite scintillation dans ses molécules.... Bien plus l'aimant, lui-même rougi sur des charbons ardents, ne présente pas la moindre apparence de lumière, ni de coruscation ce qui devrait nécessairement arriver dans l'hypothèse que nous réfutons.

Mairan n'obtient pas de la part de Halley la critique sérieuse qu'il appelle de ses vœux, ainsi qu'il l'écrit quelques années plus tard (1747) :

Je ne différerai pas longtemps d'agir en conséquence. M. Godin ayant eu alors un voyage à faire à Londres, je le priai de m'obtenir de M. Halley des remarques sur mon hypothèse, ou plutôt des objections contre ; [...] Rien n'était plus capable de me procurer de fortes & savantes objections. J'en avais réitéré la demande par une lettre ostensible envoyée à M. Godin ; mais toutes ces instances ne me valurent de la part de M. Halley que des politesses sur la manière dont j'avais traité mon sujet, sans conséquence pour l'hypothèse.

Le dépit qu'en conçoit Mairan n'est probablement pas étranger à l'histoire contée par François de Plantade dans un bulletin de la Société Royale des Sciences de Montpellier daté de 1778. Suite à l'aurore boréale de 1726, Plantade soumet à l'Académie un mémoire décrivant le déroulement de l'aurore, accompagné d'une partie théorique reprenant explicitement l'hypothèse des effluves magnétiques de Halley, mais en la précisant et la raffinant. L'Académie refuse la publication de la partie théorique, ce que Plantade attribue à la prééminence de l'explication de Mairan, à laquelle celle de Halley et la sienne feraient ombre. Plantade, vexé, retire finalement l'intégralité de son mémoire, qui sera plus tard égaré.

3.2 Les suites de l'hypothèse de Halley

Charles-François de Cisternay Dufay écrit autour de 1730 plusieurs mémoires sur le magnétisme publiés dans les Mémoires de l'Académie des Sciences. Dans son premier texte de 1728, il commence par décrire l'expérience montrant l'aimantation acquise par une barre métallique tenue verticalement. En tenant tout d'abord la barre horizontale, et préférablement dans la direction est-ouest, ainsi que l'avait déjà noté Boyle, l'aiguille d'une boussole qu'on approche de la barre ne bouge pas, conservant son orientation nord-sud. Par contre, si la barre est tenue verticalement, et qu'on approche une boussole de son extrémité supérieure, c'est le

pôle austral de l'aiguille (celui qui pointe vers le pôle boréal de la terre dans son orientation naturelle) qui est attiré, l'inverse se produisant si la boussole est approchée de l'extrémité inférieure. Ainsi, une barre tenue verticalement à la surface de la Terre s'aimante, présentant son pôle boréal en haut, et son pôle austral en bas. Dufay note que les instruments de fer restés longtemps en position verticale s'aimantent, et que cette aimantation se produit beaucoup plus rapidement pour des outils utilisés dans la manipulation du feu :

Il arrive aux pincettes quelque chose de fort différent, leurs pôles sont bien plus exactement déterminés. Quelle en est donc la cause ? Que leur arrive-t-il de particulier ? Le voici.

On se sert des pelles & des pincettes pour accommoder le feu ; étant très-minces elles s'échauffent fort vite ; on les retire ensuite du feu & on les jette négligemment auprès de la cheminée, où elles se refroidissent dans une situation perpendiculaire. Qui croirait que c'est une manœuvre aussi simple qui fait naître dans ces instruments la vertu magnétique ? Rien n'est plus vrai cependant & rien n'est plus aisé que de s'en convaincre.

Dufay cite Rohault, qui a fait ces expériences, par chauffage puis trempage dans l'eau froide, mais sans déterminer si c'est le trempage ou la position verticale qui est responsable de l'aimantation. Dufay montre que la barre tenue verticalement s'aimante aussitôt, et que sa polarité s'inverse instantanément quand on la retourne. Le fait de la chauffer, puis de la refroidir en position verticale lui confère au contraire une vertu fixe, qu'elle conserve en position horizontale.

Pour expliquer cela, Dufay fait appel à la théorie des petits poils introduite par Descartes pour justifier la circulation à sens unique de la matière magnétique dans un canal donné. Il conjecture que, lorsque la barre est tenue verticalement, les petits poils retombent les uns sur les autres par l'effet de leur poids. Les canaux où circule la matière magnétique sont vides d'air et on ne s'attend à aucun frottement empêchant les poils de se coucher vers le bas. Quand on chauffe la barre et la met en position verticale, les pores dilatés laissent tomber un grand nombre de poils, qui après refroidissement se retrouvent prisonniers de pores rétrécis, donc difficiles à renverser, ce qui explique l'acquisition d'une vertu magnétique fixe par chauffage, puis refroidissement. La théorie proposée par Dufay implique un seul sens de circulation de la matière magnétique, entrant par l'extrémité supérieure de la barre (son pôle boréal) et sortant par son extrémité inférieure (son pôle austral). Elle permet également d'expliquer que des coups de marteau appliqués à l'extrémité de la barre, permettant de débloquer les poils, impriment une aimantation à la barre. Cet effet mécanique, déjà étudié par Boyle, explique que les outils de

fer frappés au marteau, tels que ciseaux et poinçons, s'aimantent. Dufay constate également que plier et replier la barre plusieurs fois augmente sa vertu magnétique, ce que sa théorie permet d'expliquer, car l'action mécanique ainsi imprimée à la barre doit permettre à plus de petits poils de se coucher dans le sens de circulation de la matière magnétique. Il conclut de son étude que le sens de circulation est unique, contrairement à ce qu'affirme Descartes, et que la directivité est donnée par la force de pesanteur, ou par la direction du coup de marteau. Il déduit de son identification des pôles de la barre placée verticalement le sens de circulation de la matière magnétique dans la Terre :

Supposant donc un tourbillon de matière magnétique qui circule autour du globe de la terre, il y entre par le pôle septentrional, & en sort par le méridional, d'où parcourant la surface ou même l'intérieur de la terre par tous les cercles verticaux il dispose les morceaux d'aimant ou de fer suivant cette direction lorsqu'ils sont dans une situation qui leur donne la liberté de céder à ce torrent.

Dans son article de 1730, Dufay reprend son explication, et se concentre sur une propriété de l'aimant décrite par Descartes, qui serait que le pôle austral de l'aimant soulève une masse de fer plus grande que l'autre, ce qui s'expliquerait selon Descartes par le renforcement, dans l'hémisphère nord, du pôle austral de l'aimant par le pôle boréal de la Terre, problématique que Dufay invalidera dans son mémoire de 1732, en montrant que les deux pôles soulèvent les mêmes poids de fer. Il revient sur sa théorie de la circulation dans un seul sens de la matière magnétique, en expliquant que le système de l'aurore boréale de Halley cadre bien avec sa théorie :

M. Halley & plusieurs autres Physiciens depuis ont dit que la matière magnétique pouvait avoir quelque part aux lumières boréales. Sans entrer dans le détail de leurs opinions particulières, je dirai simplement qu'on pourrait les expliquer en cette sorte. Les exhalaisons inflammables, ou même dont quelques-unes sont déjà enflammées, étant répandues dans l'air, si leur degré de densité ou de pesanteur les amène à la distance de la terre où la matière magnétique circule en plus grande abondance, ce torrent qui coule vers le Nord, rassemble ces exhalaisons éparées dans toute l'atmosphère, & les réunit vers le pôle ; celles qui sont déjà enflammées embrasent les autres, ou la seule collision les allume, & le courant de matière les dispose en forme de rayons, tels que nous les voyons. On peut encore ajouter, que suivant les observations les plus exactes, le centre auquel aboutissent ces rayons, décline presque toujours vers l'Ouest de 14 ou 15 degrés, ce qui est à peu près la quantité dont l'aiguille décline présentement. Si ce centre des rayons des aurores boréales venait à suivre à l'avenir les variations de l'aimant, cela pourrait nous mener à quelque chose de plus positif : mais je ne pousserai pas maintenant plus loin cette explication, qui n'est qu'une conjecture,

quoiqu'elle ne soit pas absolument sans Vraisemblance, & qu'elle puisse devenir beaucoup plus forte, si jamais nous sommes assurés par de bonnes observations, qu'on ne voit pas de pareilles lumières vers le pôle méridional.

On remarque que l'explication donnée par Dufay diffère radicalement de celle proposée par Halley, la raison en étant que Halley, en accord avec Hartsoeker, suppose que la matière magnétique sort du pôle boréal de la Terre, et entre par son pôle austral. Dufay a démontré l'inverse, et explique l'aurore par le transport d'exhalaisons inflammables sous la poussée de la matière magnétique, circulant dans l'atmosphère vers le pôle boréal de la Terre. On note que cette explication d'une matière magnétique entraînant des émanations gazeuses est incompatible avec la supposée subtilité de la matière magnétique qui, d'après Huygens, s'écoule dans les interstices de l'air, critique déjà faite par Mairan à l'égard de Halley qui envisage aussi la participation possible au phénomène lumineux d'exhalaisons inflammables issues des profondeurs de la terre et soulevées par la matière magnétique. Elle ne rend pas compte non plus du mouvement ascendant des colonnes lumineuses s'élevant de l'horizon pendant l'aurore boréale, que Halley explique en faisant sortir la matière magnétique du pôle boréal de la Terre. Sur le principe du sens de circulation unique dans l'aimant, Dufay cite aussi l'argument des cartésiens selon lequel une aiguille aimantée posée sur l'eau devrait dans ce cas dériver vers le pôle, ce à quoi il répond, comme ses prédécesseurs partisans du sens de circulation unique, que la matière se meut librement dans l'aiguille, pour peu qu'elle soit correctement orientée suivant les pôles magnétiques terrestres.

René-Antoine Ferchault de Réaumur publie en 1725 un intéressant traité sur l'aimant. Il précise bien qu'il ne s'agit pas d'une théorie de l'aimant, et qu'il ne cherche pas à statuer sur la nature de la circulation, double ou dans un seul sens, ni sur la nature de la force magnétique. Il relie la vertu attractive de l'aimant à la taille du tourbillon magnétique qui l'entoure, auquel il donne le nom d'atmosphère, et imagine qu'un morceau de fer possède une petite atmosphère magnétique désordonnée :

Si donc on conçoit que le Fer est, pour ainsi dire, un Aimant brouillé, un assemblage d'une infinité de petits Aimants, qu'il ressemble à une masse de poudre d'Aimant ; en un mot, que le Fer a presque partout des pôles insensibles, il sera aisé de concevoir que quoiqu'il se fasse autour de ce métal & dans son intérieur une grande circulation de matière magnétique, qu'il n'en doit pas avoir plus de force attractive, parce que les tourbillons, les courants ne concourent pas vers le même endroit.

Les actions mécaniques exercées sur le fer, quand on le plie et le replie, ou le casse, chassent la matière magnétique et l'obligent « à prendre les mêmes routes », en sorte que l'aimantation se renforce. Réaumur réalise de nombreuses expériences de ce type sur des barres de fer tenues verticalement, dans certains cas chauffées puis refroidies. Il termine son mémoire par une remarque sur le sens de circulation de la matière magnétique, qui pourrait entrer selon lui par le pôle austral et sortir par le pôle boréal (donc dans le sens opposé à celui suggéré par Dufay trois ans plus tard), sans cependant s'appesantir sur la question :

La remarque par laquelle nous finirons ce mémoire c'est que le pôle qui attire la pointe du nord est toujours plus éloigné du bout supérieur du fer que le pôle, qui attire la pointe du sud, ne l'est du bout inférieur. Quelquefois le pôle inférieur se trouve presque dans le bout même & n'a de force qu'aux environs, pendant que le pôle supérieur est considérablement éloigné du bout supérieur, & que la force de ce pôle se conserve jusqu'au haut de la barre. Est-ce que la matière magnétique entrerait dans le fer par son bout inférieur & s'échapperait ensuite en s'approchant du bout supérieur.

La théorie de Halley, un temps éclipsée par la théorie concurrente de Mairan, reprend de la crédibilité au début des années 1740, quand Anders Celsius et Olof Hiorter remarquent une agitation de l'aiguille de la boussole durant les aurores. Jean-Baptiste Biot (1820) raconte que ces mouvements sont observés en coïncidence entre Londres et Upsala, qu'ils sont d'autant plus intenses que l'aurore est étendue dans le ciel, et que le foyer de l'aurore est éloigné du méridien magnétique. Mairan, dans la seconde édition de son traité de l'aurore boréale (1754), rapporte les propos suivants de l'astronome et mathématicien suédois Pehr Wilhelm Wargentin, qui écrit en 1750 :

M. Halley avait soupçonné quelque correspondance entre la Lumière Boréale & l'Aiguille magnétique. Il ajoute, que MM. Celsius & Hiorter s'étaient aperçus que cette Aiguille était quelquefois troublée, & comme inquiète, lorsque la Lumière Boréale montait jusqu'au zénith, ou passait au-delà vers la partie méridionale du Ciel, de manière que sa déclinaison semblait suivre cette Lumière & varier quelquefois de trois ou quatre degrés en quelques minutes de temps.

Wargentin réalise des observations analogues, montrant que la variation diurne régulière de l'aiguille de la boussole est perturbée par l'aurore boréale. Cependant, certaines observations faites par Wargentin durant les aurores ne montrent pas de perturbation de l'aiguille, ce qui fait dire à Mairan que le lien n'est pas systématique. Celui-ci ne nie pas une influence de l'aurore sur l'aiguille aimantée, mais considère cette action faible relativement à celle qu'exerce la terre

sur la déclinaison de l'aiguille et ses variations. Les écarts de déclinaison entre différents lieux de la Terre peuvent atteindre 25°, la déclinaison étant « *partout variable, mais annuellement & périodiquement variable ; tandis que le foyer de l'Aurore Boréale va par sauts & sans règle de l'Occident à l'Orient, & s'arrête quelquefois directement sous le Pôle, quoique communément il décline vers l'Occident, & tout cela dans la même année, dans un seul mois* ». Mairan note encore les longues périodes d'interruption de l'aurore boréale, tandis que le magnétisme suit sa marche ordinaire. Et il conclut en expliquant que le mouvement de l'aiguille est une conséquence de l'aurore, et que le magnétisme en lui-même ne peut en être la cause :

Le Magnétisme ne dépend donc pas essentiellement de l'Aurore Boréale, & il n'en est qu'accidentellement modifié dans quelques-uns de ses effets. A plus forte raison l'Aurore Boréale qui n'a jamais paru se ressentir du Magnétisme, qui ne lui ressemble en rien, ni par la visibilité des parties qui la composent, ni par la variété de ses couleurs, ni par la diversité de ses Phénomènes, ni par la vicissitude de ses reprises & de ses apparitions, ni par la région qu'elle occupe, ni par le lieu d'où elle vient, sera-t-elle indépendante du Magnétisme !

Le physicien hollandais Jean-Henri Van Swinden rapporte dans son recueil de mémoires sur l'analogie de l'électricité et du magnétisme (1785) des observations détaillées, sur de longues périodes, des variations de l'aiguille aimantée durant les aurores boréales. Il se base sur deux séries de mesures : l'une faite par le père Cotte entre 1768 et 1779 et qui porte sur 134 aurores boréales, dont 53 seulement ont agité l'aiguille, l'autre faite par lui-même entre 1771 et 1781 portant sur 284 aurores, dont 122 ont agité l'aiguille, et 20 ont altéré sa variation quotidienne. Swinden avoue ne pas avoir d'explication quant au caractère aléatoire du lien, qui ne se manifeste au mieux que dans la moitié des cas d'aurores. Partisan de l'explication de l'aurore proposée par Mairan, à savoir que la matière solaire agit sur l'aiguille quand elle pénètre suffisamment profondément dans l'atmosphère, il écrit :

Si les mouvements irréguliers dépendent de l'A. B [Aurore Boréale], elles dépendent de la matière qui la constitue, c. à. d., comme j'en suis convaincu d'après M. DE MAIRAN ; de celle de la Lumière Zodiacale, ou de l'Atmosphère solaire, Il est hors de doute que cette matière est située à une très grande hauteur dans l'Atmosphère, mais il n'en est pas moins vrai qu'elle s'approche quelquefois jusqu'à sa surface.

Il s'interroge sur la nature de l'action de la matière solaire sur l'aiguille, en notant que « *l'on sait par les expériences de M. de Mairan, que les rayons du soleil, rassemblés au foyer d'une*

lentille, n'agissent pas par leur impulsion sur les corps les plus légers, mais que le mouvement dont on s'aperçoit alors, n'est dû qu'à la chaleur ». Il cite également des expériences qui semblent montrer qu'une aiguille suspendue près d'un aimant est agitée par une flamme placée à proximité, ce qui ne se produit pas si l'aiguille n'est pas dans la sphère d'influence de l'aimant, sans cependant rien en conclure. Il évoque aussi le système de Halley, en se demandant comment la matière solaire pourrait agir sur la matière magnétique, sans noter que l'explication de Halley ne fait pas appel à la matière solaire.

Il en vient ensuite à l'explication électrique des agitations irrégulières de l'aiguille. En effet, à partir des années 1750, le développement rapide de l'étude de l'électricité atmosphérique va induire une tendance à attribuer de nombreux phénomènes à l'électricité. Concernant l'aurore boréale, John Canton a été l'un des premiers, au début du XVIII^{ème} siècle, à remarquer qu'un courant électrique traversant une enceinte vide d'air, ou à très faible pression, produit une lumière comparable à celle de l'aurore boréale. En 1753, comme nous l'avons déjà noté, Canton défend dans les *Philosophical Transactions* l'idée que l'aurore est produite par une décharge entre nuages électrisés positivement et négativement, se produisant à travers le milieu de faible résistance électrique que constitue la haute atmosphère. Comme l'écrit Bertholon dans le Dictionnaire de physique, en parlant des théories de l'aurore boréale de Halley et de Mairan :

La plupart des sentiments qu'on vient d'exposer ont été abandonnés presque aussitôt que les phénomènes électriques furent connus. On sentit bientôt que le fluide électrique devait être l'agent principal qui formait les aurores boréales, mais on n'en donna aucune explication particulière ; c'était alors un mot vague dont on se servit.

Ainsi que l'explique Swinden, de nombreux physiciens, dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle, pensent que l'aurore est un phénomène électrique, sans avoir d'explication précise, et ils déduisent de l'agitation de l'aiguille aimantée un lien entre l'électricité et le magnétisme. En quoi l'agitation de l'aiguille peut-elle dépendre de l'électricité de l'air ? Swinden cite trois sources d'induction à l'appui de cette hypothèse : « 1°. *la Constitution Électrique de l'Air dans le temps qu'on observe cette agitation.* 2°. *La similitude de ces agitations avec celles que l'Électricité peut produire, & qu'elle produit quelquefois : enfin* 3°. *l'influence du Tonnerre* ». Il passe en revue les trois types d'effets au regard de l'ensemble des observations existantes. Concernant le premier, il montre que rien ne permet de dire, à partir des mesures existantes, que l'air est plus électrique en période d'agitation de l'aiguille. Le deuxième effet serait que

l'électricité agite l'aiguille comme elle agite tout corps léger et mobile se trouvant à proximité. Or, une aiguille en laiton n'est pas agitée en période d'aurore, alors qu'une aiguille en acier l'est, ce qui contredit l'hypothèse d'une origine électrique. Par ailleurs, des expériences comparant des aiguilles à l'air libre et des aiguilles enfermées dans des boîtes par temps d'orage montrent que seules les aiguilles à l'air libre bougent, suggérant un effet des mouvements de l'air plutôt que de l'électricité. Le seul effet auquel Swinden reconnaît une réalité est l'effet direct de la foudre sur l'aiguille, car particulier du troisième effet, dont elle peut dans certains cas inverser la polarité en modifiant la substance même de l'aiguille. De son étude, Swinden conclut que « *les mouvements irréguliers de l'Aiguille aimantée ne dépendent pas de l'Électricité ; mais qu'il est très vraisemblable qu'ils sont tous dus à l'action de l'A. B. [Aurore Boréale], quoique nous ignorons comment ce météore agit* ».

A propos de l'explication électrique, on peut lire dans « *An historical miscellany of the curiosities and rarities* » (1794) un article sur l'aurore boréale étudiant l'hypothèse de Halley. Il y est rapporté notamment un propos de Joseph Priestley rapportant l'opinion de Giambattista Beccaria, de Turin, grand spécialiste de l'époque en matière d'électricité atmosphérique, quant au fluide responsable de l'aurore boréale, qu'il identifie à la matière électrique :

Puisqu'un coup de foudre soudain peut polariser des aimants, il conjecture qu'une circulation régulière de la masse entière du fluide électrique du nord au sud peut être la cause originale du magnétisme en général [...] Ce courant, il ne le suppose pas provenir d'une seule source, mais de plusieurs dans l'hémisphère nord de la terre ; et il pense que l'aurore boréale est peut-être cette matière électrique accomplissant sa circulation dans un état tel de l'atmosphère qu'elle la rend visible, ou qui le devient du fait qu'elle s'approche de la terre plus près que d'habitude. En conséquence, des apparitions très vives de ce type ont été observées occasionner une fluctuation de l'aiguille magnétique.

Beccaria reprend ainsi intégralement l'explication de Halley en substituant aux effluves magnétiques le fluide électrique. Tant l'explication de Halley, que celle de Beccaria, sont néanmoins contredites par les premières observations d'aurores australes par des occidentaux, en l'occurrence George Forster (1777), qui observe en 1773 plusieurs aurores entre 58° et 60° de latitude sud. Ces aurores montrent en effet un mouvement ascendant des colonnes lumineuses s'élevant de l'horizon, identique à celui observé dans l'hémisphère boréal. Cette observation suggère un mouvement de la matière responsable des aurores des pôles vers l'équateur, et non pas de pôle à pôle, comme l'avait supposé Halley, puis Dufay, en attribuant

au tourbillon magnétique terrestre l'origine de l'aurore. L'auteur de l'article imagine, pour se conformer à ce fait d'observation, un puits d'électricité en région tropicale, les fréquents orages déchargeant la basse atmosphère chaude et humide de son électricité dans la terre, bien plus qu'à moyenne et haute latitude. Ce puits nécessite un apport de matière électrique depuis l'atmosphère tropicale supérieure, celle-ci se rechargeant donc nécessairement par circulation de la matière électrique des pôles vers l'équateur à haute altitude. Dans un schéma un peu similaire, bien qu'inversé, Benjamin Franklin propose en 1779 une explication de l'aurore qui fait appel à la circulation de l'air de la région intertropicale vers les hautes latitudes, celui-ci transportant l'air chargé électriquement vers les pôles et accumulant par précipitation l'électricité sur la calotte de glace électriquement isolante. L'accumulation d'électricité sur la glace doit conduire à une décharge électrique entre la surface et la haute atmosphère conductrice, le fluide électrique migrant, en altitude, des pôles vers l'équateur en divergeant fortement, créant ainsi au-dessus des régions polaires la concentration lumineuse de l'aurore.

L'explication électrique des aurores a ainsi pris le pas sur l'explication magnétique à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle, par une substitution de la matière électrique à la matière magnétique. La théorie de Mairan a dès lors été délaissée. La découverte de l'influence de l'aurore boréale sur l'aiguille de la boussole a contribué à redonner à la théorie de Halley, un temps éclipsée, une certaine légitimité, même si le rapprochement entre électricité et magnétisme pour expliquer l'aurore a ensuite conduit à une perte d'intérêt pour l'aurore boréale en tant que phénomène caractérisant l'aimant terrestre, et de fait utile à la compréhension du magnétisme terrestre. Il faudra attendre le début du XX^{ème} siècle pour que l'explication de l'aurore, mêlant magnétisme, électricité et précipitation de la matière solaire, redonne tout son intérêt à l'aurore boréale comme manifestation du magnétisme. Voyons maintenant comment, après la période culminante marquée par l'interprétation de Halley, en lien direct avec les théories de l'aimant alors en cours, ces théories ont évolué dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle.

4. Le magnétisme dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle

Lemonnier est le premier à remettre en question la circulation de la matière magnétique dans et autour de l'aimant, ainsi que l'explique Fontenelle (HARS, 1733), en rejetant deux hypothèses de base de la théorie cartésienne : (i) La matière magnétique traverse le fer, l'aimant et l'acier ; (ii) il se crée un tourbillon autour de l'aimant, la matière magnétique entrant par un pôle et

sortant par l'autre. Lemonnier refait l'expérience de la limaille disposée sur un carton sous lequel est glissé un aimant en remplaçant le carton par une tôle. Il constate que l'effet de l'aimant sur la limaille disparaît alors complètement. Il en déduit que, soit la matière magnétique traverse le fer plus difficilement, soit au contraire elle le traverse si facilement qu'elle est dissipée vers les bords de la tôle avant d'atteindre la limaille. La deuxième alternative correspond à l'hypothèse cartésienne d'un écoulement facile de la matière magnétique dans le fer. Pour la tester, Lemonnier pose sur la tôle un carton qui dépasse la tôle de 10 cm sur ses quatre bords, et place de la limaille partout sur le carton, y compris à l'extérieur de la partie du carton au contact avec la tôle. Il s'attend à ce que la matière magnétique, se répandant dans la tôle, agisse sur la limaille jusqu'au bord du carton, ce qu'il n'observe pas. Il en déduit que la première alternative est la bonne, et que le fer fait obstacle à la dissipation de la matière magnétique. Ainsi, pour lui, le renforcement de l'aimant par une armure ne tient pas à l'augmentation de la taille du tourbillon magnétique par adjonction de l'armure, mais au fait que le fer de l'armure empêche la dissipation de la matière magnétique, la tenant tout entière réunie dans l'aimant. Concernant la limaille, il considère que la matière magnétique ne traverse pas les grains de limaille, mais au contraire les chasse sous la poussée, et que ce sont donc les vides entre les grains qui matérialisent le courant de matière magnétique. Il se livre à une autre expérience, à savoir faire glisser l'aimant sous le carton parallèlement à ses pôles. Reprenant l'hypothèse de Dufay d'une matière magnétique entrant par le pôle boréal et sortant par le pôle austral de l'aimant, on s'attendrait, si l'on avance l'aimant par son pôle austral, à ce que la limaille soit chassée vers l'avant et écartée, et si l'on avance l'aimant par son pôle boréal, à ce qu'au contraire il la rassemble. Or, cela n'est pas observé. Quel que soit le pôle par lequel on approche l'aimant, la limaille suit un mouvement progressif en sens contraire du mouvement de l'aimant. Lemonnier en déduit que la matière magnétique ne traverse pas le fer, et qu'il n'existe pas de tourbillon magnétique autour de l'aimant ou du fer.

À la suite de Lemonnier, le physicien hollandais Musschenbroek (1739), futur inventeur de la bouteille de Leyde, critique également le principe de la circulation du fluide magnétique. Tout d'abord, « *si [la matière magnétique] sortait de l'un des Pôles de la Terre, & qu'elle allât s'écouler vers l'autre Pôle, son écoulement ferait prendre partout à la Boussole une direction vers le véritable Méridien, & elle ne manquerait pas d'avoir toujours la même direction dans le même endroit* ». Ensuite, pour Musschenbroek, un écoulement qui sort de l'aimant doit repousser, et ne peut attirer. Par ailleurs, la vertu attractive de l'aimant est plus forte que sa vertu répulsive, or il est impossible que l'attraction produite par un retour vers l'aimant de

l'écoulement soit plus forte que la répulsion produite par la sortie de cet écoulement. Et en admettant qu'elle soit plus forte, cela signifierait que les écoulements s'accumulent au sein de l'aimant, ce qui devrait peu à peu obstruer ses pores et l'affaiblir. De plus, l'acquisition de la vertu magnétique par le fer devrait résulter, par transfert de matière, en une perte de vertu magnétique de l'aimant, ce qui n'est pas le cas. Il cite les objections élevées par Lemonnier. Il interroge également le fait que la vertu magnétique, contrairement à la vertu électrique, ne s'exerce pas sur de nombreux corps, et que par ailleurs ses écoulements ne semblent troublés par rien, contrairement aux écoulements électriques, sensibles aux conditions environnantes. Musschenbroek, dans sa critique, se met explicitement en opposition avec la doctrine cartésienne :

Deux préjugés ont donné lieu de se déclarer en faveur de ce sentiment. Le premier est l'ingénieuse explication de Descartes touchant les phénomènes de l'Aimant ; le second est fondé sur la Doctrine de ce philosophe, qui enseigne qu'un Corps n'en peut mouvoir un autre, sans le toucher & sans être en mouvement.

Etienne-François Dutour de Salvert, dans le mémoire de 1746 qui obtenu un prix de l'Académie, avec ceux d'Euler et des frères Bernoulli, invalide les objections de Lemonnier. Dutour se place dans l'hypothèse cartésienne des tourbillons magnétiques, et suppose que la matière magnétique se meut aisément dans l'aimant, et difficilement dans l'air. Concernant l'expérience de la tôle faite par Lemonnier, Dutour explique l'absence d'effet sur la limaille placée au bord du carton par le caractère désordonné de la distribution de l'orientation des petits poils dans les pores de la tôle :

Cette tôle, dont les petits poils qui tapissent ses pores sont dans une parfaite confusion, devient un assemblage d'une infinité de petits Aimants, dont les pôles se trouvent placés çà & là, irrégulièrement, & sans aucun ordre ; & il est aisé de concevoir qu'il peut circuler en dedans & en dehors de la tôle, une grande quantité de matière Magnétique, sans que cette matière puisse agir sensiblement sur de la limaille de fer, parce que ces tourbillons & ces courants ne concourent pas vers le même endroit, & que la matière Magnétique n'a de force qu'à proportion qu'elle est réunie & ramassée.

Pour Dutour, la matière magnétique se propageant en toutes directions dans la tôle, et ne se concentrant pas sur une direction privilégiée, est incapable d'orienter les petits poils de façon suffisamment cohérente pour générer un effet magnétique collectif sur la limaille. Concernant la deuxième expérience de Lemonnier, dans laquelle la limaille suit le même mouvement

progressif, qu'on approche l'aimant par un pôle ou par l'autre, Dutour n'y voit aucune contradiction. Pour lui, chaque grain de limaille est un petit aimant, comme le montre le fait que les grains de limaille se dressent quand on approche l'aimant, et le mouvement de la limaille à l'approche de l'aimant, qui consiste en un basculement des grains oblongs d'une de leurs extrémités sur l'autre du fait du défilement des filets magnétiques, quel que soit le pôle par lequel on approche l'aimant, s'explique parfaitement. Et en effet, l'argument de Lemonnier ne tient que si l'on suppose que la matière magnétique exerce une pression sur les grains de limaille. Or, pour Dutour, il n'y a pas d'effet de ce genre, mais simplement un alignement des tourbillons des grains de limaille, aisément traversés par la matière magnétique, avec celui de l'aimant.

Le mémoire de Dufour reprend la théorie de l'attraction de l'aimant développée par Huygens d'une minimisation du volume des tourbillons mêlés, sauf que, pour lui, ce n'est pas l'éther mais le tourbillon magnétique « général » (celui de la Terre) qui exerce la compression. Il s'attaque à la fin du mémoire à la question de la déclinaison magnétique. Il contredit l'idée de Rohault selon laquelle la variabilité de la déclinaison serait due aux mines de fer, et avance une explication en termes d'hétérogénéité magnétique de la Terre :

Cette non uniformité des routes que suivent les filets Magnétiques qui tourbillonnent autour de ces Aimants, ainsi rapprochés, & que la limaille de fer nous trace toujours fidèlement, nous représente au naturel, quoiqu'en petit, celle des routes que décrit la matière du tourbillon général, & de laquelle nous devons la découverte aux déclinaisons différentes de l'aiguille aimantée ; & de là je suis très-porté à croire que les causes du phénomène dans la matière du tourbillon général, & dans celle des tourbillons particuliers sont semblables : ainsi je ne puis m'empêcher de m'écarter un peu de l'hypothèse commune, selon laquelle on considère le globe de la terre comme un seul & unique Aimant, ou pour mieux dire, de faire à cette hypothèse un changement, assez léger dans le fonds. J'imagine donc, que la terre pourrait renfermer dans son sein plusieurs grands Aimants, qui seraient ramassés autour de son axe, & dont les pôles Austraux aboutiraient aux environs de son pôle de même nom, & les Boréaux aux environs de l'opposé. Au reste, j'ose dire que cette supposition n'a rien que de naturel ; car qu'est-ce qui est le plus difficile à concevoir, ou que la terre a un seul Aimant pour son noyau, ou qu'il est formé de plusieurs Aimants réunis ensemble ?

Il reprend la carte de déclinaisons publiée par Halley en 1692 et tente de disposer plusieurs aimants sous un carton où est placée la limaille de fer, en les orientant en sorte de reproduire les écarts observés. Il critique la théorie de Hartsoeker, reprise de Halley, d'un aimant à

l'intérieur de la Terre qui tournerait à une vitesse différente, voire de plusieurs aimants intérieurs emboîtés. Il imagine plutôt que « *les grands Aimants qui forment le noyau de la terre, peuvent se fortifier & s'affaiblir, devenir plus abondants en matière Magnétique, & en perdre : les volcans [...] peuvent calciner quelques parties de ces Aimants* », et également que « *l'eau qui se filtre dans la terre, est aussi capable d'altérer la vertu des grands Aimants ; elle charrie avec elle une infinité de corps métalliques & de toutes espèces, qui, par son moyen, peuvent s'insinuer dans les pores des Aimants, & causer du dérangement dans les petits poils qui tapissent ses pores* ».

Le mémoire des frères Daniel et Jean Bernoulli, également gratifié par un prix de l'Académie des Sciences la même année, est particulièrement intéressant, en cela notamment qu'il remet à l'honneur la théorie du double courant introduite par Descartes un siècle auparavant, mais dans une conception largement rénovée. La matière magnétique y est assimilée à un fluide élastique se déplaçant à travers l'aimant, considéré comme un « *corps composé de fibres tendues, élastiques & parallèles, agitées d'un mouvement très rapide, réciproque & ondoyant* ». Les Bernoulli supposent que les fibres se contractent et se dilatent alternativement, faisant circuler la matière magnétique du fait de cette pulsation, et imaginent à la place des petits poils de Descartes un jeu de soupapes n'autorisant la circulation que dans un sens, comme pour la circulation des sucs dans les végétaux. Le mouvement d'agitation interne de la matière magnétique est changé en mouvement progressif au sein de l'aimant, avec une perte d'élasticité du fluide. Lorsque le fer est approché de l'aimant, il se crée une dépression à la sortie de la matière magnétique du fait de cette perte d'élasticité, et le fer se rapproche de l'aimant. Le tourbillon qui se crée autour de l'aimant est comprimé par la matière magnétique environnante, comme chez Dutour, et réagit à cette compression du fait de sa propre élasticité et de la force centrifuge. Le fluide magnétique, comme chez Descartes, circule dans les deux sens. Les Bernoulli remplacent le système d'écrous de Descartes par une notion de « *relation harmonieuse* » entre le fluide et la fibre, dont on comprend qu'elle tient à l'existence, ou pas, d'une résonance entre les fréquences de vibration du fluide et de la fibre, qui doit être respectée pour que le fluide puisse circuler.

La réaffirmation de la conception cartésienne de l'aimant dans les mémoires primés par l'académie en 1746 ne doit pas masquer les interrogations nées des critiques adressées par Lemonnier et Musschenbroek dans la décennie précédente, mais également les travaux de Molière (1737), ensuite raffinés par Béraud (1748), qui remettent explicitement en question le

principe de circulation de la matière magnétique. L'abbé Joseph Privat de Molière reprend le concept d'atmosphère magnétique introduit par Réaumur, nécessaire à l'explication de l'effet de l'aimant sur la limaille de fer, mais, pour lui, « *on ne voit pas que cette matière y circule d'un pôle à l'autre en traversant le corps de l'aimant dans des conduits parallèles à son axe ; on le suppose* ». Il pense qu'il est inutile de supposer cette circulation contre nature, et « *qu'on peut sans son secours expliquer plus simplement & mieux qu'on ne l'a fait jusqu'à présent tous les phénomènes de l'aimant* ». Molière n'accorde pas aux grains de la matière magnétique le pouvoir de se repousser, ni de s'attirer, mais seulement de s'orienter conformément les uns aux autres :

On peut donc penser avec fondement que les petits aimants dont les pores du fer & de la pierre d'aimant sont remplis, ne sont autre chose que les particules mêmes de la matière magnétique ; & qu'indépendamment de la construction particulière du fer & de la pierre d'aimant, les petits points de la matière magnétique dont les pores de ces corps sont remplis, ont par quelque cause qui nous est encore inconnue, & que nous déterminerons ci-après, la vertu, non pas de s'attirer l'une l'autre, ni de se joindre & de s'attacher avec force l'une à l'autre ; mais simplement celle de se diriger l'une vers l'autre, [...]

Pour expliquer la vertu attractive de l'aimant, Molière remplace les tourbillons par des atmosphères, et attribue la vertu répulsive à un manque d'affinité entre les atmosphères, comme entre l'huile et l'eau, et la vertu attractive à une affinité permettant leur mélange. Ainsi, dans le cas répulsif, quand deux corps se rapprochent, leurs atmosphères commencent par se comprimer et s'aplatir l'une contre l'autre, puis reprennent ensuite leur forme sphérique, éloignant les deux corps l'un de l'autre. Au contraire, si les atmosphères de deux corps sont de même nature, elles vont se confondre, et amener ces corps au contact l'un de l'autre. Dans ce dernier cas, « *ce qui tiendra ces aimants attachés l'un à l'autre sera l'effort élastique de la matière éthérée, effort beaucoup plus grand que n'est celui de l'air grossier* ». Lorsqu'on approche un morceau de fer d'un aimant, les petits aimants de l'atmosphère de l'aimant s'approchent de ceux qui sont dans les pores du fer, et les contraignent « *à la longue de tourner sur leur centre, malgré les petits obstacles qui les retiennent, & de prendre une direction parallèle à la leur* ». Concernant la Terre prise comme un grand aimant, Molière ne fait appel à la théorie des tourbillons de Descartes que pour l'approvisionnement et la mise en place initiale des globules magnétiques :

Mais il n'est pas nécessaire pour expliquer les phénomènes de l'aimant que ces globules magnétiques rentrent dans la Terre, ni qu'ils circulent dans l'air d'un pôle à l'autre, comme Descartes l'avait supposé. Car il suffit, ainsi que nous l'avons expliqué si au long dans ce Mémoire, qu'ils demeurent tellement arrangés que leurs pôles a regardent toujours le pôle Boréal de la Terre, & leurs pôles b le pôle Austral, & nous venons ce me semble de décrire assez distinctement la cause de cet effet.

De sorte qu'il nous suffit de penser que la Terre, après avoir fourni à l'air une quantité suffisante de globules magnétiques, a pu dans la suite cesser d'en fournir de nouveaux, ou de ne continuer d'en fournir que fort peu ; comme nous voyons qu'elle ne fournit pas ou que très peu de nouvelle eau. Que la Terre a fourni de ces petits corps magnétiques autant que l'air a pu s'en charger, & qu'elle a conservé les autres dans son sein ; comme l'on voit que l'eau ne se charge de sels qu'autant qu'elle en peut supporter, & que le reste demeure au fond du vaisseau sans se dissoudre.

On trouve à l'entrée MATIÈRE MAGNÉTIQUE du Dictionnaire de physique (1793) un résumé de la conception de l'aimant à la fin du XVIII^{ème} siècle. Ce texte rappelle tout d'abord que les physiciens sont divisés sur la manière dont le fluide magnétique exerce son action, certains imaginant qu'il circule, d'autres qu'il est fixe. La théorie des tourbillons de Descartes est rappelée, puis quelques objections à la circulation de la matière magnétique sont formulées :

- *Comment se fait-il que cette matière traverse tous les corps, & fasse disposer la limaille de fer seule, autour d'un aimant, lorsqu'un autre corps, bois, verre, métal, carton, &c., est interposé entre l'aiguille & la limaille, & lorsque l'on place un corps opaque dans le chemin que l'on suppose que suit le courant ?*
- *Pourquoi est-ce toujours, d'un ou de plusieurs points particuliers de l'aimant, que sort & entre le courant magnétique, & point des extrémités ?*
- *& comment se fait-il, que l'on peut changer la position de ces points, les augmenter & les diminuer, en aimantant un barreau ?*
- *Pourquoi ce courant ne dispose-t-il, dans les courbes que l'on suppose décrites par la matière magnétique, que le fer & l'acier qu'elle rencontre ?*
- *Pourquoi le fer, magnétisé par influence, dans lequel, en conséquence, la matière magnétique s'est mise en mouvement, ce mouvement cesse-t-il dès que le corps influençant n'exerce plus son action ?*
- *Comment, en aimantant une aiguille, à laquelle on ne donne que deux pôles semblables, le courant peut-il se former, de quel côté sort-il, de quel point entre-t-il ? &c , &c.*

Aux objections déjà mentionnées concernant le caractère irréaliste d'une matière qui traverse quasiment tous les corps, et n'a d'action que sur le fer et l'acier, s'en ajoutent d'autres liées spécifiquement à la géométrie variable des pôles de l'aimant ou au caractère rapidement

réversible de l'aimantation du fer par influence quand on retire l'aimant. Ces dernières objections portent sur la capacité, dans l'aimantation par influence, qu'a la matière magnétique de changer de voies dans le fer, voire d'interrompre sa circulation, ce qui effectivement ne peut être compris dans la vision cartésienne de tourbillons éternels et stables. L'ensemble de ces arguments ont amené les physiciens à considérer que la matière magnétique est fixe dans l'aimant et le fer. Les modalités d'action de cette matière fixe sont les suivantes :

[...] la matière magnétique, qui n'a été remarquée exister, jusqu'à présent, que dans le fer, le nickel & le cobalt, y est entièrement fixée ; [...] elle ne peut en sortir ; [...] chaque particule de ces métaux est combinée avec des particules de matière magnétique, [...] les particules de cette matière exercent, l'une sur l'autre, une action répulsive, tandis qu'elles exercent une action attractive sur les molécules de fer, de nickel & de cobalt ; [...] par l'action d'un corps magnétisé sur l'un de ces trois métaux, la matière se déplace, & [...] de ce déplacement résulte l'action magnétique, en raison inverse du carré des distances.

Dans cette conception, chaque particule de fer devient un petit aimant par l'action d'un corps magnétisé, ceci par l'intermédiaire de la matière magnétique présente au sein de la particule. Dans l'état non perturbé, la matière magnétique est uniformément répartie dans la particule de fer. Sous l'effet du corps magnétique, elle migre vers un bout de la particule, qu'elle va lier à la suivante, car, d'une part les particules de matière magnétique et les molécules de fer s'attirent mutuellement, d'autre part les particules de matière magnétique se repoussent entre elles. De cette façon, le déplacement de la matière magnétique dans la particule de fer la transforme en un petit aimant, tous ces petits aimants se disposant en chaîne tout le long du barreau, le pôle boréal d'une particule fixant le pôle austral de celle qui l'avoisine, avec des centres d'action nommés pôles à chaque extrémité. Dans l'aimant, la présence d'une autre substance que le fer (l'oxygène dans la magnétite, le carbone dans l'acier, le soufre dans la pyrite) fait rempart et empêche la matière magnétique de passer d'une particule à l'autre. Dans le fer, la matière magnétique peut passer d'une particule à l'autre, et l'aimantation ne se maintient pas, levant l'une des principales objections à la circulation de la matière magnétique. On retrouve très précisément l'idée que Molière a introduite dès 1737 de particules de fer immobiles, qui, au lieu de s'attirer ou se repousser, s'orientent seulement les unes par rapport aux autres, le mouvement de la matière magnétique responsable de cette orientation se limitant au périmètre de chaque particule de fer. Cette conception est proche de celle de Gassendi, exprimée plus d'un siècle plus tôt (1649), que nous avons précédemment présentée. Une variante de ce schéma consiste à supposer l'existence de deux matières magnétiques, l'une boréale, l'autre australe,

migrant symétriquement vers les deux extrémités de la particule. L'article se termine par la mise en doute de l'existence même de la matière magnétique.

Il apparaît que la théorie de Halley des aurores boréales n'est pas explicitement rediscutée et révisée en fonction de cette évolution de la conception de la matière magnétique dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle. Cela est dû en grande partie au fait qu'elle est reléguée au second plan par l'explication électrique, qui s'impose dès le milieu du siècle. De plus, autant le magnétisme de l'aimant que les mécanismes de l'aurore boréale demeurent encore à cette époque extrêmement mystérieux, et on voit mal ce que l'évolution de la conception de l'aimant aurait pu apporter à la vision intuitive, et pour l'essentiel qualitative, de Halley. Néanmoins, celui-ci, tant par ses travaux sur la déclinaison magnétique à la surface de la terre que sur l'aurore boréale, a clairement apporté de l'eau du grain à moulin aux magnéticiens de l'époque, comme le montrent par exemple les travaux de Dufay sur l'aimant ou de Swinden sur les perturbations induites par l'aurore sur l'aiguille de la boussole.

5. Conclusion

L'interprétation de l'aurore boréale proposée par Halley met de fait en évidence la question, sur le fond de la doctrine cartésienne assez secondaire, du sens de circulation de la matière magnétique dans l'aimant. La directivité du mouvement des colonnes aurorales, qui s'élèvent de l'horizon vers le ciel, suggère à Halley la circulation d'une matière magnétique sortant de la terre par le pôle boréal et qui, conformément à la vision de Descartes, y entre donc par le pôle austral. A l'époque où Halley écrit son article sur l'aurore boréale de 1716, le principe du double courant de Descartes a déjà été remis en question au profit d'une circulation dans un seul sens, comme Huygens l'a le premier proposé, et Halley peut donc s'appuyer sur cette notion de circulation à sens unique. Dufay reprendra l'explication de Halley pour illustrer sa théorie, mais en inversant, conformément à son idée des petits poils orientés par la gravité, le sens de circulation de la matière magnétique, sortant du pôle austral pour entrer par le pôle boréal. Pour Halley, cette matière est projetée dans l'éther, et si la conception cartésienne implique que la déviation de la matière se produise dans l'atmosphère, et donc que le tourbillon magnétique soit totalement immergé dans la matière du deuxième élément (l'air), Halley, n'étant pas cartésien, n'a aucune raison de placer l'aurore dans l'atmosphère, et, d'ailleurs, il pense que les colonnes peuvent s'élever hors de l'atmosphère, lui qui ne la croit pas plus haute qu'une centaine de kilomètres. Une difficulté rencontrée par Halley, et d'ailleurs également par Dufay, est

d'expliquer le caractère lumineux des aurores. L'un et l'autre invoquent comme explication de base le rôle des vapeurs inflammables transportées par la matière magnétique depuis l'intérieur de la terre ou la basse atmosphère, mais sans aucunement discuter la difficulté d'imaginer un tel processus, compte-tenu du niveau de subtilité requis des vapeurs pour que celles-ci puissent être mécaniquement emportées par la matière magnétique, elle-même extrêmement subtile. Halley propose une deuxième explication. Il a postulé quelques années auparavant, pour expliquer la dérive temporelle des pôles magnétiques, l'existence, à l'intérieur de la terre, d'une deuxième terre concentrique et plus petite. Selon lui, une matière similaire à l'atmosphère du soleil pourrait être présente entre la surface de cette terre intérieure et l'enveloppe constituée par la terre extérieure, éclairant les possibles habitants de la terre intérieure, et générant la lumière de l'aurore lorsque cette matière, subtile par essence, est entraînée par la matière magnétique dans le tourbillon de l'aimant terrestre hors de la terre extérieure. Suivant cette idée, dont il faut noter qu'elle n'est que brièvement mentionnée dans l'article de Halley, qui la considère à juste titre comme spéculative et critiquable, on retrouve ainsi la matière solaire, ou de type solaire, supposée par Mairan précipiter dans l'atmosphère, mais dans ce cas provenant du globe terrestre où elle est emprisonnée. On est frappé, dans les deux cas, par le caractère hautement imaginatif des processus proposés, qui font appel à au moins trois types de matière subtile (matière solaire, matière magnétique, air subtil), et en même temps par la justesse des intuitions des deux savants, dont la véritable explication résulte peu ou prou d'un alliage. Dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle, Beccaria reprend la conception générale de Halley en substituant à la matière magnétique la matière électrique, mais autant l'une que l'autre de ces théories seront rapidement infirmées par la découverte d'aurores australes présentant le même mouvement ascendant des colonnes aurorales, et donc suggérant une circulation des pôles vers l'équateur, ou bien de l'équateur vers les pôles, et non pas de pôle à pôle. C'est dans ce nouveau paradigme que Benjamin Franklin, et d'autres, proposeront des explications de nature électrique de l'aurore. Dans le même temps, le principe même de l'existence d'un courant de matière magnétique dans l'aimant est abandonné sous l'impulsion de Molière, et malgré le lien évident avec le magnétisme, démontré par les observations de la boussole en présence d'aurores à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle, la théorie de Halley ne sera pas davantage reprise et développée. Outre cette alliance de l'imagination et de l'intuition juste, et le grand nombre de matières subtiles impliquées, il faut remarquer le concept, qui remonte à Gilbert, de la terre comme modèle naturel de l'aimant, l'aimant terrestre et ses manifestations, telles que l'aurore ou la dérive des pôles magnétiques, apportant à la connaissance du magnétisme en général, et réciproquement.

Chapitre 5. Matière électrique

1. Introduction

L'observation des globes de feu (météoroïdes) constitue au XVIII^{ème} siècle une méthode d'estimation de la hauteur de l'atmosphère. La nature du lien qui est fait entre l'altitude de ces météores et la hauteur de l'atmosphère évolue considérablement au cours du siècle. Suivant la doctrine cartésienne héritée d'Aristote, ces feux sont d'origine terrestre et s'élèvent vers le sommet de l'atmosphère du fait de leur légèreté. On trouve par exemple, à ce sujet, dans le grand dictionnaire géographique de Bruzen de la Martinière (1726) l'explication suivante :

On ne peut pas douter que tous ces feux ou météores ne soient formés par des exhalaisons sulphureuses, qui sortent de la terre, & qui venant à s'enflammer pèsent beaucoup moins que la partie de l'air dont elles occupent la place; mais quelque légères qu'elles soient, elles ne laissent pas pour cela d'être plus pesantes que l'æther, que nous considérons sans aucune pesanteur. C'est pourquoi elles doivent s'élever jusques sur la surface de l'Atmosphère, où elles nagent tant qu'elles durent ; ainsi la hauteur de ces feux doit être la même que celle de l'Atmosphère, & par conséquent les quinze lieues de la hauteur observée de celui-ci, ce qui revient à 35000 toises, confirment ce que M. de la Hire a trouvé pour la hauteur de l'Atmosphère.

L'atmosphère y est ainsi assimilée à un océan, à la surface duquel les feux météoritiques, remontant toute l'atmosphère, viennent flotter. Ce paradigme sera totalement et définitivement remis en question à la fin du XVIII^{ème} siècle avec l'affirmation par Ernst Chladni, théorie à l'appui, de l'origine extraterrestre des étoiles tombantes (nom donné à l'époque aux étoiles filantes) et des globes de feu, et du rôle joué par l'atmosphère dans l'échauffement et l'incandescence des bolides. Ainsi, c'est la friction générée par l'entrée de ces bolides dans l'atmosphère qui signe la présence de l'atmosphère à l'altitude où ils deviennent lumineux. Ce changement de paradigme va mettre près d'un siècle à pleinement s'accomplir, entre son amorçage par Edmond Halley, dans un article de 1714 attribuant aux globes de feu une origine extraterrestre, sur la base de leurs vitesses considérables et de leurs trajectoires rectilignes, qui lui semblent incompatibles avec une origine atmosphérique, et la théorie, pour l'essentiel exacte, que Chladni expose dans le détail en 1794, à savoir que les bolides sont des corps primitifs qui n'ont pas été impliqués dans l'accrétion des planètes, ou des fragments de planètes, et qui subissent en entrant dans l'atmosphère un chauffage intense. Entre temps, dès 1719,

Halley infirme sa première explication, et sur la base d'expériences de laboratoire, assimile les globes de feu à des flammes se déplaçant à grande vitesse sur des traînées de matière inflammable élevées à partir du sol par temps chaud, se replaçant donc dans le cadre cartésien d'une origine terrestre de ces météores. Il faut mentionner que, si Halley est le premier à émettre dans son article de 1714, sur la base d'une analyse scientifique, l'hypothèse d'une origine extraterrestre des globes de feu, d'autres l'ont fait avant lui, mais sans argumentaire précis. Citons Coulvier-Gravier (1847), à propos de Kepler :

Képler, au commencement du XVII^{ème} siècle, pensait que les étoiles tombantes étaient formées de matières visqueuses enflammées ; que les unes se dissipent en tombant, tandis que d'autres plus lourdes arrivaient jusqu'à terre. Pour lui, quelques-uns de ces météores, sous l'apparence de globes à l'état fluide, venaient des régions éthérées, semblables à de petites comètes, et pénétraient dans notre atmosphère, où elles devenaient visibles en s'enflammant.

John Wallis, dans un article de 1677, évoque un globe de feu qui a survolé l'Angleterre en septembre 1676, et se demande s'il ne pourrait pas s'agir d'une petite comète passée près de la terre, comme celle vue en mai de l'année suivante, mais ne fournit pas d'arguments pour étayer sa proposition. Au XVII^{ème} siècle, les comètes ne font déjà plus partie, aux yeux du plus grand nombre, des « météores » d'origine atmosphérique, suite à l'observation non ambiguë par Tycho Brahé d'une distance de la comète de 1577 très supérieure à celle de la lune. Assimiler les globes de feu à des comètes, dont l'origine extraterrestre est acceptée, constitue donc l'hypothèse la moins « subversive » pour ceux qui pensent qu'ils ne sont pas d'origine atmosphérique.

L'historique de l'évolution des idées en la matière durant le XVIII^{ème} siècle est fourni dans différentes parutions récentes (par ex. Sears, 1965 ; Beech, 1990 ; Kronk, 2014). Ces articles décrivent les différentes explications physiques des globes de feu avancées au cours du XVIII^{ème} siècle, à travers un très petit nombre de publications marquantes (se comptant sur les doigts d'une main), notamment l'hypothèse d'une origine électrique, sans cependant que celle-ci y soit particulièrement détaillée quant à son contexte et ses multiples développements. Globalement, cette hypothèse est justifiée par la ressemblance entre l'explosion du globe de feu, à la fin de sa course, et le tonnerre, et par sa très grande vitesse de déplacement, évoquant celle de l'électricité, que matérialise la rapidité de la foudre associée au tonnerre. Le développement très rapide de l'étude de l'électricité atmosphérique au milieu du XVIII^{ème}

siècle, sous l'impulsion de scientifiques tels que, notamment, Benjamin Franklin, ou Giambattista Beccaria, utilisant de longues tiges métalliques, ancêtres du paratonnerre, et des cerfs-volants, pour capter cette électricité, met l'électricité sur le devant de la scène en la transformant en clé d'explication de nombreux phénomènes, dont les météores (dans l'acception cartésienne du terme), qui incluent l'activité orageuse, mais également les globes de feu, les étoiles tombantes et les aurores boréales. Beccaria note la ressemblance entre les étoiles tombantes et son cerf-volant, entouré du halo lumineux émis par le fluide électrique provenant de l'atmosphère. William Stukeley, sur la base d'une soi-disant concomitance entre aurores boréales et tremblements de terre, déjà présente dans l'article de Halley de 1717 sur l'aurore boréale de 1716, pour y être au demeurant contredite, attribue en 1750 une cause électrique aux séismes, idée qui est ensuite reprise par Beccaria, et Pierre Bertholon, notamment. Certains, tel le comte Bernard-Germain de Lacépède, bâtissent même des systèmes du monde basés entièrement sur les effets du fluide électrique.

Concernant les globes de feu, l'idée d'une charge électrique générée par le frottement entre le corps et l'atmosphère est émise par un savant américain, Thomas Clap, dès le milieu du XVIII^{ème} siècle, pour expliquer le bruit de l'explosion, assimilé à une décharge électrique entre le corps et la terre. Clap, tout comme son contemporain John Pringle, un savant anglais qui remet en avant, cinquante ans après Halley, l'explication fournie par celui-ci dans son article de 1714, sont parmi les seuls scientifiques à défendre à cette époque le caractère de corps solide, de type planétaire, des bolides. Ils les assimilent à des comètes en orbite terrestre, idée dont on a vu qu'elle avait été défendue par Johannes Kepler et John Wallis au siècle précédent. Le physicien anglais Charles Blagden publie en 1784 une étude attribuant une origine purement électrique aux globes de feu, dans laquelle il donne des arguments contre l'idée de comètes en orbite terrestre, les bolides consistant plutôt, selon lui, en un nuage de matière fine changeant constamment de forme, qui pourrait être néanmoins une atmosphère entourant un corps solide. Ainsi, jusqu'à la toute fin du XVIII^{ème} siècle, la majeure partie de la communauté scientifique résiste-t-elle à l'idée d'une origine extraterrestre des globes de feu, et des étoiles tombantes, au profit d'une vision unificatrice s'inscrivant dans la tradition cartésienne et rassemblant l'ensemble des météores au sein d'une même famille de phénomènes lumineux de nature électrique, dont la stratification verticale est ainsi décrite par Blagden dans son article de 1784 :

Si les conjectures précédentes sont exactes, des régions distinctes doivent être attribuées aux phénomènes électriques de notre atmosphère. Ici-bas, nous avons le tonnerre et les éclairs, dus à la

répartition inégale du fluide électrique entre les nuages ; dans les régions plus élevées, où les nuages n'arrivent jamais, nous avons les différentes gradations des étoiles filantes ; jusqu'à ce que, au-delà des limites de notre atmosphère crépusculaire, le fluide soit mis en mouvement en masses suffisantes pour maintenir une trajectoire déterminée et présenter les différentes apparences de ce que nous appelons des globes de feu ; et probablement à une altitude encore plus grande au-dessus de la terre, l'électricité s'accumule sous une forme plus légère et moins condensée, pour produire les courants et les coruscations merveilleusement diversifiés des aurores boréales.

Dans la partie 2, nous retraçons l'histoire de la mise en évidence du lien entre électricité et activité orageuse, qui constitue la base du lien qui sera ultérieurement établi entre électricité et météores autres que l'orage. La partie 3 est consacrée aux connaissances théoriques sur le fluide électrique au milieu du XVIII^{ème} siècle, au moment de l'accélération du développement des recherches expérimentales sur l'électricité naturelle. Dans la partie 4, nous retraçons les premiers développements scientifiques relatifs aux globes de feu au XVII^{ème} siècle et dans la première partie du XVIII^{ème} siècle, préalablement à l'apparition de la théorie électrique des globes de feu et des étoiles tombantes au milieu du XVIII^{ème} siècle. Nous développons dans la partie 5 l'histoire des explications par l'électricité des globes de feu et des étoiles tombantes, en traitant également le cas des aurores boréales, phénomène à cette époque fréquemment associé aux deux autres, et montrons la nature des débats qui ont agité la communauté entre tenants et opposants de l'hypothèse électrique. La partie 6 est consacrée à l'explication fournie par Chladni à la fin du XVIII^{ème} siècle, qui va balayer toutes les hypothèses faites jusqu'alors, y compris l'hypothèse électrique. Nous avons pris le parti dans ce texte d'appeler systématiquement « étoiles tombantes » les étoiles filantes, conformément à la terminologie utilisée au XVIII^{ème} siècle et « globes de feu » les météoroïdes, également désignés par certains auteurs de l'époque comme feux volants, ou boules de feu..

2. Mise en évidence du lien entre électricité et activité orageuse

2.1 Les premières avancées expérimentales

On trouve dans l'histoire de l'électricité de Priestley (1771) de nombreux éléments historiques relatifs au développement des connaissances en électricité. Dans les années 1660, Otto Von Guericke est le premier à construire une machine produisant de l'électricité. Il réalise un globe de soufre, en moulant un mélange de soufre liquide et de minéraux dans un globe de verre, qu'il

casse ultérieurement. Ce globe, qu'il considère comme un modèle réduit du globe terrestre, mis en rotation autour d'un axe horizontal et frotté avec la main, est le siège de nombreuses manifestations, comme l'attraction ou la répulsion d'objets légers, tels qu'une plume, ou encore des crépitements sonores et des lueurs visibles dans l'obscurité. Guericke établit un parallèle entre les forces d'attraction et de répulsion électriques exercées par le globe de soufre et celles exercées par la terre sur les corps qui l'environnent, soit les attirant et provoquant leur chute, soit les repoussant à une certaine distance, comme la lune, qui tourne autour de la terre en lui présentant toujours la même face. Or, Guericke croit avoir observé que les plumes et autres objets, en s'éloignant du globe après l'avoir touché, lui présentent toujours la même face. Ainsi, émet-il l'hypothèse que la terre est une grande machine électrique. Les manifestations lumineuses et sonores de l'électricité produite par sa machine sont cependant de faible intensité, exigeant, pour être perçues, que l'appareil soit opéré dans l'obscurité, et à proximité de l'expérimentateur.

Francis Hauksbee, au tournant du XVIII^{ème} siècle, s'intéresse plus particulièrement aux manifestations lumineuses de l'électricité, comme ces lueurs bleutées qui apparaissent dans l'espace vide au-dessus du mercure d'un baromètre, lorsque celui-ci est secoué dans l'obscurité, phénomène déjà observé par Jean-Félix Picard quelques décennies plus tôt. Hauksbee comprend que c'est le frottement du mercure sur le verre qui en est à l'origine, et que, d'autre part, l'intensité des lueurs dépend de la qualité du vide. Il réalise en 1705 une expérience dans un globe de verre en remplaçant le mercure par de l'ambre frotté, puis s'aperçoit qu'en frottant le verre lui-même de l'extérieur, une lueur violette intense apparaît à l'intérieur du globe, et que, par ailleurs, le globe en rotation attire fortement les objets légers. Entre 1705 et 1709, il construit plusieurs machines électriques sur ce principe, certaines en utilisant un cylindre de verre, plus facile à manipuler qu'un globe, dans le double but d'étudier l'émission de lumière et l'attraction électrique. A la même époque, en 1708, William Wall réalise des expériences sur l'ambre. En frottant rapidement un morceau d'ambre avec du drap, et en le serrant fortement dans la main, il note très grand nombre de petits craquements, dont chacun produit un petit éclat de lumière. Le craquement est plus important quand on présente le doigt à une petite distance de l'ambre. Wall est, selon Priestley (1771), l'un des premiers à émettre explicitement l'hypothèse d'une analogie entre électricité et activité orageuse :

Si quelqu'un présentait le doigt à une petite distance de l'ambre, on entendait un grand craquement, suivi d'un grand éclat de lumière. Ce qui me surprend beaucoup en cette éruption, c'est qu'elle frappe

le doigt très-sensiblement et y cause une impression de vent, à quelque endroit qu'on le présente. Le craquement est aussi fort que celui d'un charbon sur le feu, et une seule friction produit cinq ou six craquements...

Cette lumière et ce craquement paraissent, en quelque façon, représenter le tonnerre et les éclairs.

Les progrès durant les vingt années qui suivent sont lents, les machines de Hauksbee étant essentiellement utilisées à des fins de démonstration pour le grand public. À la fin des années 1720, Stephen Gray, un teinturier, spectateur attentif des démonstrations de Hauksbee, montre que les métaux, même frottés avec énergie, n'attirent pas les objets légers. Ils s'électrifient par contre instantanément au contact de la machine de Hauksbee, et peuvent conduire l'électricité à de grandes distances, tout comme l'eau, alors que le verre ou la résine, qui peuvent être électrisés par frottement, au contraire, l'arrêtent sur une distance très courte, distinguant ainsi ce que nous appelons aujourd'hui matériaux conducteurs et isolants. Incidemment, selon Bertholon (1787), Gray évoque, dans une correspondance de 1735, l'analogie possible entre le tonnerre et l'électricité, mais sans apporter d'explication détaillée.

Charles François de Cisternay Dufay réalise au début des années 1730 de nombreuses expériences. Il montre en particulier que la couleur et le degré de transparence d'une matière par elle-même n'ont aucune influence sur ses propriétés électriques, et étudie avec l'abbé Jean-Antoine Nollet la propagation de l'électricité le long de cordes mouillées, montrant que celle-ci peut se propager sur plusieurs centaines de mètres. C'est à l'occasion d'une expérience avec un tube de verre frotté et une feuille d'or, qu'approchant un morceau de résine frotté de la feuille d'or, il découvre que la résine attire la feuille, alors qu'elle devrait la repousser s'il n'existait qu'un seul type d'électricité. Il en déduit l'existence de deux espèces électriques (qu'on appelle aujourd'hui positive et négative), s'attirant l'une l'autre, tandis que les particules de chacune d'entre elles se repoussent.

Mais c'est l'invention, début 1746, de la bouteille de Leyde, ville du physicien Peter Van Musschenbroek, qui va relancer les spéculations sur l'analogie possible entre l'étincelle électrique et la foudre. Voici ce qu'écrit Musschenbroek à Réaumur dans une lettre d'avril 1746 :

Je faisais quelques recherches sur la force de l'électricité. Pour cet effet, j'avais suspendu à deux fils de soie bleue un canon de fer qui recevait par communication l'électricité d'un globe de verre que l'on faisait tourner rapidement sur son axe pendant qu'on le frottait en y appliquant les mains ; à

l'autre extrémité pendait librement un fil de laiton dont le bout était plongé dans un vase de verre rond, en partie plein d'eau, que je tenais dans ma main droite, et avec l'autre main j'essayais de tirer des étincelles du canon de fer électrisé. Tout d'un coup ma main droite fut frappée avec tant de violence, que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un coup de foudre ; [...]

La motivation de Musschenbroek, en créant cette expérience, était de concentrer dans un corps électrisé une quantité d'électricité plus grande qu'il n'avait jamais été fait auparavant, en entourant ce corps d'un corps isolant, car les corps électrisés au contact de l'air perdent rapidement leur électricité. Pour faire cela, il utilisa le verre comme corps isolant, et électrisa de l'eau contenue dans un vase de verre. De nombreux scientifiques, dont l'abbé Nollet, refont l'expérience dans les années qui suivent, et expérimentent tous la décharge violente décrite par Musschenbroek. On trouve une description détaillée de l'expérience à l'entrée COUP FOUROYANT de l'encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751). L'idée d'une circulation du fluide électrique, entrant dans le corps par le bras qui tire l'étincelle du conducteur, et en sortant par la main qui tient la bouteille, occasionnant une secousse dans les articulations (poignets, coudes) se trouvant sur le trajet du fluide électrique, y est clairement exprimée par l'auteur de l'article. Mais celui-ci considère que le fluide électrique qui atteint la main tenant la bouteille passe à travers le verre, en provenance de l'eau contenue dans la bouteille, tandis que Benjamin Franklin, un savant américain de Philadelphie, pense que l'électricité ne peut pas traverser le verre, et circule de la paroi intérieure de la bouteille vers sa paroi extérieure en empruntant la passerelle constituée par le conducteur et le corps de l'expérimentateur. D'après l'explication qu'il fournit en 1749, dans un premier temps rejetée par la communauté, ce n'est pas l'eau, mais la paroi intérieure de la bouteille qui se charge de fluide électrique au contact de l'eau électrisée, cet excès de fluide étant compensé par une raréfaction équivalente sur la paroi extérieure de la bouteille. Reprenant l'idée d'un lien entre électricité et orages, fortement suggérée par la violence de la décharge reçue dans l'expérience de Leyde, qui rappelle celle de la foudre, l'abbé Nollet écrit en 1748 dans ses leçons de physique (Bertholon, 1787) :

Si quelqu'un, par exemple, entreprenait de prouver par une comparaison bien suivie des phénomènes, que le tonnerre est entre les mains de la nature, ce que l'électricité est entre les nôtres, que ces merveilles dont nous disposons maintenant à notre gré, sont de petites imitations de ces grands effets qui nous effrayent, & que tout dépend du même mécanisme : si l'on faisait voir qu'une nuée préparée par l'action des vents, par la chaleur, par le mélange des exhalaisons, &c., est vis-à-vis d'un objet terrestre, ce qu'est le corps électrisé, en présence & à une certaine proximité de celui qui ne l'est pas ; j'avoue que cette idée, si elle était bien soutenue, me plairait beaucoup ; & pour la soutenir, combien

de raisons spécieuses ne se présentent pas à un homme qui est au fait de l'électricité ? L'universalité de la matière électrique, la promptitude de son action, son inflammabilité & son activité à enflammer d'autres matières ; la propriété qu'elle a de frapper les corps extérieurement & intérieurement jusques dans leurs moindres parties ; l'exemple singulier que nous avons de cet effet dans l'expérience de Leyde ; l'idée qu'on peut légitimement s'en faire, en supposant un plus grand degré de vertu électrique, &c. Tous ces points d'analogie que je médite depuis quelque temps commencent à me faire croire, qu'on pourrait, en prenant l'électricité pour modèle, se former, touchant le tonnerre & les éclairs, des idées plus saines & plus vraisemblables que tout ce qu'on a imaginé jusqu'à présent.

2.2 Caractérisation de l'électricité naturelle de l'atmosphère

L'année suivante, Benjamin Franklin assimile également la foudre à une décharge électrique dans une lettre adressée à la *Royal Society*, mais va plus loin que Nollet en proposant de tester son idée en tentant de capter, avec une longue pointe métallique, l'électricité supposée de l'atmosphère durant les jours d'orage. Voici les arguments de Franklin en faveur de la similitude entre le fluide électrique et la foudre, tels que rapportés par Bertholon (1787) :

1°. Propriétés communes au fluide électrique & à la foudre ; 2°. De rendre la lumière, la couleur de cette lumière ; 3°. la direction en zigzag ; 4°. La rapidité du mouvement ; 5°. sa facilité à se laisser conduire par les métaux ; 6°. Le bruit ou le craquement dans l'explosion ; 7°. de subsister dans l'eau ou dans la glace ; 8°. de déchirer les corps au travers desquels il passe ; 9°. de tuer des animaux ; 10°. de fondre les métaux ; 11°. d'allumer les substances inflammables ; 12°. l'odeur sulfureuse ; - le fluide électrique est attiré par les pointes ; - nous ne savons pas si la foudre a cette propriété ; - mais puisque ces deux substances conviennent en tous les points dans lesquels on a pu les comparer jusqu'à présent, n'est-il pas probable qu'elles conviennent également en celui-ci ? il serait à propos d'en faire l'expérience.

Pierre Bertholon relate dans le détail les nombreuses expériences de captation de l'électricité atmosphérique par de longues barres métalliques, suite à la proposition de Franklin. Thomas-François Dalibard est le premier, en mai 1752, à tenter l'expérience à Marly-la-Ville en utilisant une barre d'une douzaine de mètres de longueur, pointue à son extrémité supérieure, convenablement isolée du sol. Durant un orage, après un coup de tonnerre, approchant un fil de fer à quelques centimètres de la barre, plusieurs étincelles se produisent, dont l'une blesse l'opérateur au bras. La même année, plusieurs autres expérimentateurs, dont Franklin aux Etats-Unis et Canton en Angleterre, et d'autres en Italie, en Allemagne et en Russie, observent le même phénomène. Pierre-Charles Lemonnier, notamment, réalise en juin 1752 une expérience

à Saint-Germain-en-Laye, dans laquelle un fil de fer d'une centaine de mètres est attaché à la barre de fer en son milieu et repose à son autre extrémité sur un cordon de soie tendu horizontalement dans un pavillon, qui le protège de la pluie. Suite à un coup de tonnerre précédé d'un éclair, il tire une étincelle très intense du fil de fer, et ressent une secousse semblable à celle procurée par la bouteille de Leyde, expérience répétée à plusieurs reprises durant toute la durée de l'orage. La ressemblance entre la matière électrique reçue par la barre et celle qu'on obtient à partir des machines de Hauksbee, est frappante. Lemonnier écrit :

Ce fil attirait & repoussait très vivement les corps légers que je lui présentais ; la matière sortait en étincelant avec éclat ; elle excitait dans le bras de plusieurs personnes qui se tenaient par la main, une commotion considérable ; elle sortait par les pointes, sous la forme d'une aigrette ; elle enflammait l'esprit-de-vin & les liqueurs spiritueuses ; elle exhalait l'odeur particulière à la matière électrique ; en un mot, elle paraissait avoir tout le caractère de la matière électrique que nous excitions avec nos instruments, & qui la différencie de tous les autres fluides.

A la même époque, Romas montre qu'une barre s'électrise d'autant mieux qu'elle est placée à une plus grande hauteur. Il est, avec Franklin, à l'origine de l'idée d'utiliser des cerfs-volants, au lieu de barres métalliques, pour accéder à de plus grandes hauteurs dans l'atmosphère. A l'été 1753, Romas opère un cerf-volant d'environ 2 m² de surface, dont la corde est garnie sur toute sa longueur d'un fil de cuivre et connectée à sa base à un tuyau de fer blanc, lui-même distant du sol d'environ 1 m, instrument qui permet d'atteindre une hauteur de 200 m. Le temps est orageux, mais sans éclair et quasiment sans tonnerre. Les manifestations électriques observées sont nombreuses et spectaculaires. Outre les étincelles tirées du tuyau de fer, dont certaines très violentes, rappelant les décharges de la bouteille de Leyde, on voit des filaments lumineux danser entre le sol et le tuyau. Ces filaments sont au final attirés par le tuyau, provoquant chacun, au moment du contact, une explosion rappelant le bruit du tonnerre, accompagnée d'une lueur vive en forme de fuseau. Puis ils se propagent en remontant le long de la corde, tantôt attirés et tantôt repoussés par elle, produisant des lames de feu chaque fois qu'ils sont attirés par la corde, celles-ci pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres de longueur, voire quelques mètres ainsi qu'il est observé dans une expérience analogue menée en 1757. On observe par ailleurs autour de la corde un cylindre de lumière permanent d'une dizaine de centimètres de diamètre.

De telles expériences sont réalisées de nombreuses fois dans la décennie 1750, montrant des manifestations électriques significatives, même par beau temps. Après avoir décrit les

expériences de cerfs-volants menées par plusieurs expérimentateurs, dont Romas, Franklin, Beccaria et Musschenbroek, entre autres, Bertholon tire les principales conclusions. Tout d'abord, la hauteur à laquelle l'électricité commence à être sensible est variable et dépend du degré d'humidité de l'air inférieur. Par temps humide, il faut élever le cerf-volant plus haut. Ensuite, l'électricité atmosphérique peut être positive, par beau temps, ou négative, après un orage. Le degré d'électricité dépend également de la météorologie. Durant la pluie, il diminue, tandis qu'il augmente quand un nuage passe au-dessus du cerf-volant, ou lorsque celui-ci est soulevé plus haut par le vent.

Dans la même période, deux savants de renom, John Canton en Angleterre, et le Giambattista Beccaria en Italie, mènent indépendamment l'un de l'autre des expériences en laboratoire sur le pouvoir conducteur de l'air (Priestley, 1771). Canton utilise pour mesurer l'électricité de l'air une paire de balles de sureau suspendues par deux fils parallèles au même support, la répulsion mutuelle entre les deux balles étant proportionnelle à la charge électrique de l'air environnant. Dans une expérience menée en 1753, il électrise un tube de fer blanc, qui a une paire de balles suspendues à l'une de ses extrémités. Les balles se repoussent en conséquence. Touchant le tube du doigt, celles-ci se rapprochent, mais continuent à se repousser, ce qui montre que les balles conservent une électricité résiduelle, provenant selon lui de l'air voisin qui s'est électrisé au contact du tube. Il constate que, si l'air dans la pièce est suffisamment sec, l'air autour du tube peut rester électrisé pendant plus d'une heure. Par contre, si l'on approche les balles du plancher ou d'un meuble, elles se rapprochent et reviennent au contact à proximité immédiate d'un conducteur quelconque. Dans un mémoire publié en 1754, Canton conclut de ses travaux « *que l'air sec, à une grande distance de terre, s'il est dans un état électrique, y demeure jusqu'à ce qu'il rencontre quelque conducteur* ».

A la même époque, Beccaria mène des expériences de nature comparable en suspendant des fils de lin sur une chaîne électrisée. La chaîne est connectée à un globe tournant électrisé par frottement. Il constate qu'au départ, après quelques tours du globe, les fils s'écartent les uns des autres, mais qu'ensuite ils se rapprochent, bien que l'on continue à faire tourner le globe, ce qui devrait au contraire augmenter l'électrification des balles. Ceci peut s'interpréter comme étant dû à une électrification progressive de l'air autour de la chaîne qui perd ainsi en continu une partie de l'électricité qui lui est fournie par le globe. Puis, arrêtant l'électrification un long moment, on constate que les fils redeviennent peu à peu parallèles, avant d'à nouveau diverger en l'absence de toute nouvelle électrification, cette divergence pouvant se maintenir une heure

ou davantage. Ce phénomène peut s'interpréter comme une transition vers un état dans lequel la chaîne a perdu toute son électricité au profit de l'air ambiant, la nouvelle divergence étant due à l'électricité de l'air. Si, alors, on touchait la chaîne, lui ôtant tout ce qu'il restait d'électricité, aussitôt les fils se séparaient davantage. « *Ainsi plus l'électricité de la chaîne était diminuée, plus l'électricité de l'air était apparente* ». Par cette expérience, écrit Priestley, « *il [Beccaria] prouve que l'air qui est contigu à un corps électrisé acquiert par degré la même électricité ; que cette électricité de l'air agit de manière opposée à celle du corps, & diminue ses effets ; & que, comme l'air acquiert cette électricité lentement, il la perd de même* ».

On trouve dans le *Mémoire sur la Météorologie* publié en 1774 par le père Louis Cotte un exposé synthétique de la théorie de Benjamin Franklin sur la formation des nuées orageuses et du tonnerre. C'est à la vapeur d'eau s'élevant de la terre qu'est attribuée la capacité de se charger du fluide électrique répandu dans les couches d'air qu'elle traverse, et cela particulièrement en été, la température élevée rendant l'eau plus conductrice. A mesure que les vapeurs s'élèvent, elles rencontrent un air plus froid et plus sec que celui qu'elles quittent. Présentant, du fait de la plus grande chaleur qui y règne, une plus grande affinité avec le fluide électrique que l'air ambiant, plus froid, ces masses de vapeurs continuent à se charger en électricité à partir de l'air ambiant. Les différents phénomènes météorologiques, comme les vents, concourant à renforcer le contraste de température entre les masses d'air humide, et celles d'air ambiant sec, augmentent le confinement du fluide électrique dans les masses d'air humide. Et voici, ainsi que le rapporte Cotte, comment se forment les orages d'après Franklin :

Ces vapeurs qui s'élèvent formeront différents nuages, ces nuages occuperont différents points en latitude & en hauteur ; ils formeront alors des amas immenses de vapeurs chargées de fluide électrique & parfaitement isolés ; voici maintenant comment ces orages éclateront & se termineront :

« Les nuages élevés dans les hautes régions, dit M. Mauduyt [un tenant de la théorie de Franklin], y perdent de moment en moment quelque chose de leur premier degré de chaleur, & par conséquent de leur affinité avec le fluide électrique, ils en étaient d'abord avides, ils s'en trouvent ensuite saturés, ils en sont enfin surchargés, & ils en contiennent plus qu'ils n'en peuvent retenir ; ce fluide tend à s'échapper, & sa tendance à l'équilibre détermine ce qu'un nuage en contient de surabondant, à se précipiter, ou sur le premier corps élevé au-dessus duquel passe le nuage, ou sur un autre nuage qui flottant au-dessus ou au-dessous, contient moins de fluide électrique. Dans ce moment l'orage éclate, & le premier coup de tonnerre devient la cause de tous les autres ; soit que les nuages secoués & agités se précipitent les uns sur les autres, & que selon qu'ils sont chargés ou dépouillés, la foudre

passer des uns aux autres, soit que rencontrant dans leurs cours des corps élevés, ils leur communiquent ce qu'ils ont de plus qu'eux.

Mais les vapeurs perdant de plus en plus de leur chaleur par leur séjour dans les hautes régions, & les premiers coups de tonnerre ayant éclaté, la quantité de fluide électrique qui augmentait la désunion des vapeurs, étant moins considérable, elles doivent se rapprocher, se condenser & se résoudre en pluie ; les gouttes qui se forment, qui se succèdent & qui tombent, sont des conducteurs qui rapportent, du foyer orageux vers la terre, le fluide électrique que les vapeurs avaient transporté, l'équilibre se rétablit & l'orage finit. »

Comme le remarque Cotte, cette explication ne résout pas la question de l'origine du fluide électrique, ni celle du caractère sporadique des orages, le fluide électrique et la vapeur d'eau étant uniformément présents dans l'atmosphère. Le père Beccaria développe une conception analogue, basée sur ses propres expériences.

Jean-Paul Marat, médecin et physicien, émet l'hypothèse que le bruit du tonnerre n'est pas dû à la percussion de l'air provoqué par la foudre, mais à l'explosion de vapeurs inflammables, « *élevées des corps organisés qui périssent à la surface de la terre* », se trouvant sur le trajet de l'éclair lumineux. Pour lui :

[...] ces vapeurs, en se dilatant tout-à-coup, frappent brusquement au dehors un grand volume d'air qui frappe à son tour les couches dont il est environné ; chaque secousse se communique successivement au fluide des sons, & de leur impression sur l'organe de l'ouïe, résultent ces bruyants éclats. Il faut donc bien distinguer le tonnerre qui n'est autre chose que ce bruit & ces roulements, & la foudre qui consiste essentiellement dans le trait fulminant échappé de la nuée.

Il reprend ainsi l'explication défendue par les tenants de la théorie ancienne des vapeurs inflammables, en introduisant l'électricité comme source de l'étincelle qui enflamme les vapeurs, théorie ancienne que Bertholon (1787) décrit ainsi, en parlant des vapeurs et exhalaisons rejetées par les animaux et les plantes à la surface de la terre :

Ces vapeurs & ces exhalaisons différentes, composées de soufre, de bitume, de sel, de nitre en particulier, en un mot, de toutes les substances sulfureuses, grasses, inflammables & volatiles des animaux, végétaux & minéraux, s'élèvent dans l'atmosphère ; elles y flottent au gré des vents, & y subissent une infinité de combinaisons. Dans le temps d'orage elles sont agitées & réunies ; leur mélange, leur choc & leur frottement les font fermenter, & de cette fermentation résulte une flamme & une détonation,

pour aussitôt critiquer le caractère théorique et irréaliste de ces hypothèses :

Accordons même que les huiles essentielles soient formées par la nature, dans l'atmosphère, comme elles le sont par les mains du chimiste ; qu'elles ne souffrent dans l'élévation aucune décomposition ; qu'elles ne se combinent point avec une infinité de matières hétérogènes exhalées dans les airs ; qu'elles y conservent leur pureté ; qu'elles n'y perdent point, par leur évaporation, leur esprit recteur [caractère odorant]. Les acides nitreux & vitrioliques, nécessaires pour l'inflammation de ces huiles, ne pourront produire cet effet, puisqu'ils seront altérés par les diverses matières exhalées, avec lesquelles ils ont quelque affinité, & par les différentes substances avec lesquelles ils se combinent. D'ailleurs, l'acide nitreux, il en est de même de l'acide vitriolique, pour opérer l'inflammation, doit être concentré.

Bertholon argumente par ailleurs sur le fait que la foudre se transmet instantanément, ce qui ne devrait pas se produire en cas de combustion des exhalaisons, et que par ailleurs, dans l'hypothèse d'une combustion chimique, la foudre n'a aucune raison d'être attirée par les pointes métalliques. Il écarte aussi la possibilité d'inflammations successives co-localisées, comme on observe dans le cas des éclairs, s'il s'agit de matières inflammables, que la combustion doit épuiser. Bertholon, non seulement n'accepte pas la théorie des exhalaisons, mais pas non plus l'hypothèse « mixte » de Marat qui introduit l'électricité comme déclencheur de l'inflammation.

L'opinion négative de Bertholon n'est pas partagée par d'autres savants de l'époque. Ainsi, Pilatre Derozières, dans un court article paru dans les Observations sur la Physique (1780), soutient une théorie similaire à celle de Marat, sur la base d'expériences d'extraction d'air inflammable, ou matière phosphorique (on dirait aujourd'hui : hydrogène moléculaire), des corps organiques. Cet air inflammable, beaucoup plus léger que l'air, s'élève haut dans l'atmosphère une fois qu'il est rejeté par les végétaux. Derozières lui attribue la propriété de s'enflammer et d'exploser sous l'effet de l'étincelle électrique constituée par la foudre. Pour lui, l'agitation résultant de cette explosion est plus de nature à engendrer la pluie qu'une simple décharge électrique. Cela expliquerait également que le tonnerre est plus fréquent en été, la chaleur de l'été extrayant plus efficacement l'air inflammable des végétaux. On trouve aussi une opinion recoupant l'idée de Marat exprimée par Volta dans les Lettres sur l'Air inflammable des marais (1778), reproduite par Cotte sans son mémoire sur l'aurore boréale de 1788. Il y écrit :

Mais, selon moi, si un juste milieu, & un système de liaison & d'équilibre est préférable à tout autre, même en Physique, notre opinion qui tend à faire concourir à la production d'un même effet deux forces qui, de nos jours, se sont élevées à un si haut degré de réputation & de puissance, que l'électricité & les airs méphitiques, devrait réunir les suffrages & l'approbation générale des Savants.

3. Les connaissances sur la nature de l'électricité au milieu du XVIII^{ème} siècle

L'entrée ÉLECTRICITÉ de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert fournit une synthèse des connaissances en la matière au tournant de la seconde moitié du XVIII^{ème} siècle. L'électricité y est définie comme « *les effets d'une matière très-fluide & très-subtile, différente par ses propriétés, de toutes les autres matières fluides que nous connaissons ; que l'on a reconnue capable de s'unir à presque tous les corps, mais à quelques-uns préférablement à d'autres ; qui paraît se mouvoir avec une très grande vitesse, suivant des lois particulières ; & qui produit par ses mouvements des phénomènes très singuliers* ». La matière électrique constitue une atmosphère plus ou moins resserrée autour des corps électrisés, qu'il s'agisse de corps électriques, électrisés par frottement (verre, résine, ...), ou non électriques (métaux, eau, corps vivants, ...), électrisés par contact avec un corps électrisé. Cette matière se communique à tous les corps non électriques, quelle que soit leur étendue, et ce dans une quantité d'autant plus grande qu'ils ont plus de surface et de longueur, se distribuant uniformément dans toute leur étendue. Elle en sort librement dès qu'on établit quelque part un contact avec la terre. De courtes interruptions dans la continuité de cette matière n'empêchent pas la matière électrique de se propager, l'électricité passant facilement au travers de l'air. Une caractéristique essentielle de ce fluide est qu'il se déplace à très grande vitesse, parcourant un espace de 2000 toises (4 km) « *dans un temps indéfinissable* », que cela soit en se répandant dans un corps électrique, ou en refluant de ce corps à la simple approche d'un corps non électrique (conducteur). Concernant l'attraction et la répulsion, « *les corps légers sont attirés par ceux qui sont électriques, jusqu'à ce qu'ils soient autant électrisés qu'eux par la communication, & que leurs atmosphères soient devenues aussi denses que celle du corps qui la leur a communiqué.* » Ainsi, la répulsion électrique entre deux corps s'exerce tant que leurs atmosphères électriques sont également denses, et cesse si l'on affaiblit l'une ou l'autre. Le degré de répulsion entre deux corps est une mesure de leur degré d'électricité.

L'entrée FEU ÉLECTRIQUE de l'Encyclopédie insiste sur l'association faite à cette époque entre le feu et la matière électrique. Cette association est suggérée par les nombreuses expériences d'électricité montrant l'apparition de lueurs, ou d'étincelles douloureuses :

Ce fut à l'occasion de la douleur que ressentit M. Dufay, en tirant par hasard une étincelle de la jambe d'une personne suspendue sur des cordons de soie, qu'il pensa que la matière électrique était un véritable feu, capable de brûler aussi bien que le feu ordinaire ; & que la piqûre douloureuse qu'il avait ressentie, était une vraie brûlure. Enfin plusieurs savants d'Allemagne ayant répété les expériences de M. Dufay, & poursuivi ses recherches, M. Ludolf vint à bout d'enflammer l'esprit-de-vin par une étincelle électrique qu'il tira du pommeau d'une épée, & confirma par cette belle expérience, la vérité de ce qu'avait avancé M. Dufay, sur la ressemblance du feu & de la matière électrique.

La lumière rendue par un corps frotté, si le corps avec lequel on le frotte communique avec la terre, est d'autant plus intense que la quantité de matière électrique accumulée est importante. La décharge très violente obtenue dans l'expérience de Leyde « *ressemble si fort par ses effets aux éclairs & aux tonnerres, que plusieurs physiciens n'ont pas fait difficulté d'assurer qu'un éclat de tonnerre n'était autre chose qu'une très violente étincelle électrique* ».

La nature du fluide électrique est inconnue. Trois hypothèses prédominent : (i) soit il s'agit d'un fluide spécifique, comparable au fluide magnétique de l'aimant, (ii) soit le feu électrique est très proche du feu élémentaire, (iii) soit il s'agit d'un aspect de l'éther qui regrouperait « *effets de gravité, de ressort, de dureté, de chaleur, de magnétisme, & d'électricité* », cette troisième hypothèse semblant difficile à accepter, vu que ces différents effets peuvent se présenter suivant un grand nombre de combinaisons différentes dans la nature. La ressemblance possible avec la matière magnétique est suggérée par l'effet constaté d'étincelles électriques sur l'orientation de la boussole ou l'aimantation de petites aiguilles. Ainsi, « *il y a longtemps que l'on a observé qu'un éclat de tonnerre (qui n'est qu'une grosse étincelle électrique) est capable d'aimer toute sorte d'outils de fer & d'acier enfermés dans des caisses ; de donner aux clous d'un vaisseau assez de vertu magnétique pour faire varier d'assez loin les boussoles ; en un mot, de changer en véritables aimants les croix de fer des anciens clochers, qui ont été plusieurs fois exposés aux vives impressions de ce terrible fluide* ». Mais, pour l'abbé Nollet, la matière du feu électrique est celle du feu élémentaire :

M. l'abbé Nollet définit donc l'électricité, l'état d'un corps qui reçoit continuellement de dehors les rayons d'une matière subtile, tandis qu'il élance au-dehors des rayons divergents d'une semblable matière. L'auteur appelle effluente la matière qui s'élance des corps électrisés, & affluente celle qui vient de l'air & de la plupart des corps du voisinage.

[...]

Chaque particule de matière électrique est comme une petite portion du feu élémentaire, enveloppée de quelque matière grasse, saline ou sulphureuse, qui la contient & qui s'oppose à son expansion : lors donc que la matière effluente qui s'élance d'un corps électrisé, rencontre l'affluente qui se présente pour entrer ; si la vitesse respective de ces deux courants est assez grande, le choc brise les enveloppes de ces particules, & le feu qu'elles renferment devenu libre, éclate, brille, & anime du même mouvement les parties semblables qui sont contiguës, comme pourrait un grain de poudre à canon enflammé en embraser une infinité d'autres placés de suite. Or comme la matière effluente s'élance en forme d'aigrettes, ces rayons lumineux conservent la même forme : il résulte de ce choc subit un bruit ou sifflement qu'on entend quand les aigrettes sortent, & qui est d'autant plus sensible que le corps est plus fortement électrisé.

4. Travaux précurseurs sur les globes de feu

Durant les XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle, les globes de feu et les étoiles tombantes constituent un phénomène récurrent qui va peu à peu mobiliser les savants. On dénombre vingt cinq cas de globes de feu décrits durant ces deux siècles, dans une gamme d'altitude estimée comprise entre 40 et 160 km. On compte une bonne quinzaine d'articles sur la question publiés au XVIII^{ème} siècle dans les *Philosophical Transactions*. Ces phénomènes sont rangés, jusqu'à la fin du XVIII^{ème} siècle, dans une seule catégorie, celle des météores, qui incluent tous les phénomènes atmosphériques, tels qu'éclairs, grêle, etc... Dans le système aristotélicien, tous ces phénomènes, y compris les comètes, sont considérés comme d'origine atmosphérique. Ils sont la manifestation de vapeurs, certaines froides et humides donnant lieu aux nuages et aux précipitations, d'autres, inflammables, qui montent jusqu'au sommet de l'atmosphère, juste sous la première sphère céleste, et donnent lieu aux comètes et aux étoiles tombantes.

Si l'origine extraterrestre des comètes est établie, et relativement bien acceptée, dès le XVI^{ème} siècle, il n'est pas de même des étoiles tombantes et des globes de feu, dont l'origine extraterrestre ne sera unanimement reconnue qu'au milieu du XIX^{ème} siècle. Descartes, dans la première moitié du XVII^{ème} siècle, théorise la physique des météores en s'inscrivant dans la tradition d'Aristote. Il écrit :

Mais comme nous avons déjà remarqué qu'il éclaire quelquefois sans qu'il tonne, ainsi aux endroits de l'air où il se rencontre beaucoup d'exhalaisons et peu de vapeurs, il se peut former des nues si peu épaisses et si légères, que tombant d'assez haut l'une sur l'autre elles ne font ouïr aucun tonnerre, ni n'excitent en l'air aucun orage, nonobstant qu'elles enveloppent et joignent ensemble plusieurs exhalaisons, dont elles composent non seulement de ces moindres flammes qu'on dirait être des étoiles qui tombent du ciel, ou d'autres qui le traversent, mais aussi des boules de feu assez grosses, et qui, parvenant jusques à nous, sont comme des diminutifs de la foudre.

[...] Pour la durée des feux qui s'arrêtent ou voltigent autour de nous, elle peut être plus ou moins longue, selon que leur flamme est plus ou moins lente, et leur matière plus ou moins épaisse et serrée; mais pour celle des feux qui ne se voient qu'au haut de l'air, elle ne saurait être que fort courte, à cause que, si leur matière n'était fort rare, leur pesanteur les ferait descendre.

Dans ces lignes, Descartes attribue explicitement aux étoiles tombantes une origine similaire à celle de la foudre, bien qu'elles n'en constituent à ses yeux qu'une manifestation diminuée, due à la légèreté des vapeurs qui leur donne naissance. La matière ici enflammée doit être tenue, compte-tenu de la brièveté de ces phénomènes lumineux, sans quoi ces feux auraient le temps de descendre jusqu'à nous. Concernant les boules de feu, il fait très vraisemblablement allusion au phénomène aujourd'hui appelé « *foudre en boule* », ou foudre globulaire, longtemps confondu avec celui des globes de feu formés par l'entrée de bolides dans l'atmosphère.

La doctrine aristotélicienne n'est cependant pas unanimement acceptée. Concernant le globe de feu apparu sur l'Allemagne en 1623, premier événement de ce type réellement documenté, Csegka rapporte que le mathématicien Wilhelm Schickard a été invité par le Doyen de la Faculté de Philosophie à écrire un rapport circonstancié. La hauteur estimée du météore était considérable, de l'ordre de 148 km. Schickard exprime dans son rapport son scepticisme sur les idées d'Aristote en la matière en ces termes :

Il en résulte aussi, une fois de plus, que cette boule, qui ne bouge pas du tout dans l'air du bas mais dans le ciel pur, éthéré ... Le lieu, la matière, l'origine et le modus generandi ne correspondent pas aux modalités habituelles non plus qu'à la description aristotélicienne.

Le bolide du 21 mars 1676 observé dans le ciel de Bologne a fait l'objet d'un essai publié par Montanari (*Fiamma Volante*), qui en a été le témoin direct. Son altitude a été estimée à 60 km, et sa vitesse à 4 km/s. Sa dimension apparente équivalait à celle de la lune, impliquant un diamètre d'au moins 800 m, et il a émis un long sifflement, suivi d'une explosion. La taille considérable de l'ovale lumineux, attribué alors à celle du corps solide enflammé, et les

manifestations sonores violentes qui ont accompagné son passage, rendent le phénomène spectaculaire et inquiétant. Ce globe de feu, ainsi que trois autres apparus sur l'Allemagne et l'Angleterre entre 1680 et 1708, constituent, avec le bolide qui a survolé l'Angleterre en 1708, le sujet d'un article visionnaire de Edmund Halley paru en 1714 dans les *Philosophical Transactions*. Halley s'y livre à une reconstitution minutieuse de la trajectoire du bolide de 1708. Il évoque une clarté similaire à celle de la lune sur un cercle de 100 miles (160 km) à la ronde. Il s'interroge sur les raisons d'une vitesse si considérable et d'une trajectoire si parfaitement horizontale, sur la nature de la substance enflammée, et exprime ses doutes sur la pertinence de l'hypothèse cartésienne d'une origine terrestre, via une exhalaison qui devrait surmonter le froid et la ténuité de la haute atmosphère pour ainsi fournir une lumière intense. L'hypothèse de Halley est qu'une accumulation de matière s'est récemment produite par rencontre fortuite d'atomes dans l'éther, suivant la doctrine atomiste d'Epicure, et que la Terre l'a croisée sur son orbite. Il conclut :

Car sa direction était exactement opposée à celle de la Terre, qui faisait alors un angle avec le méridien (le Soleil étant à environ 11 degrés du Bélier) de 67 Gr., c'est-à-dire que sa course allait du S.O.O. à l'E.N.E. C'est pourquoi le Météore semblait se déplacer dans le sens contraire : et en plus de tomber dans la puissance de la gravité terrestre, et de perdre son mouvement à cause de l'opposition du milieu, il semble qu'il descendit vers la Terre, pour aller s'éteindre dans la mer Tyrrhénienne, au sud-ouest de Leghorn. Le grand coup entendu lors de sa première immersion dans l'eau, et le grondement, rappelant celui d'une charrette tirée sur des pierres, étant ce qui réussit à l'éteindre ; quelque chose comme on l'observe toujours lorsqu'on éteint un fer très chaud dans l'eau. Ces faits ayant été contestés, je serais heureux d'avoir l'avis des experts là-dessus et de savoir quelle objection peut raisonnablement être faite à l'hypothèse susmentionnée, que je soumetts humblement à leur censure.

Halley n'est pas le premier à évoquer une origine extraterrestre des globes de feu. John Wallis, en 1677, a publié dans les *Philosophical Transactions* un article dans lequel il a émis l'hypothèse que le bolide apparu sur l'Angleterre en 1676 pourrait être une petite comète qui est passée près de la Terre, et il a fait le rapprochement avec la comète parue en mai 1677. Mais dans son article de 1719 qui fait suite à un nouvel événement, Halley revient sur son opinion d'une origine extraterrestre, malgré le caractère particulièrement violent du bolide qui survole l'Angleterre cette année-là à haute altitude (≈ 110 km), faisant entendre une explosion, avec bris de verre au sol. Il écrit :

Nous pouvons modestement calculer qu'il a parcouru plus de 300 miles (480 km) en une minute, ce qui est une rapidité tout à fait incroyable, et telle que si un corps lourd était projeté horizontalement avec la même vitesse, il ne descendrait pas par gravité vers la Terre, mais s'envolerait plutôt, et se déplacerait autour de son centre dans un orbe perpétuel, ressemblant à celui de la Lune.

Cet argument devrait logiquement l'amener à postuler l'origine extraterrestre du bolide, ce qu'il ne fait pourtant pas. La raison en est qu'il ne pense plus que le corps enflammé soit de nature solide. Il l'interprète à présent comme une flamme se propageant le long d'une trainée de matière inflammable provenant de vapeurs sulfureuses qui, de par leur légèreté « innée » et grâce à une sorte de *Vis Centrifuga*, s'élèvent bien au-dessus des limites habituellement admises de l'atmosphère et condensent en une trainée de matière inflammable :

Nous pouvons ainsi comprendre comment la matière du météore a pu être soulevée d'une grande partie de la surface de la Terre et s'élever bien au-dessus des limites reconnues de l'atmosphère ; où, étant désengagés de toutes les autres particules [...] ses atomes peuvent, avec le temps, entrer en coalescence et se rassembler fortuitement, comme nous le voyons avec les sels dans l'eau ; et se contractant progressivement en un faisceau plus étroit, pourraient reposer comme un train de poudre à canon dans l'éther, jusqu'à ce qu'ils prennent feu par une fermentation interne, comme en provoque fréquemment l'humidité dans les mines, la flamme se communiquant aux parties voisines et se propageant comme un train mis à feu.

Son changement de point de vue entre 1714 et 1719 est motivé par l'expérience du révérend Whiteside, réalisée au *Ashmole's Museum* à Oxford puis à la *Royal Society*, montrant que des vapeurs de poudre à canon, quand elles sont chauffées dans le vide (ou à faible pression), brillent dans l'obscurité et se mettent en suspension. Selon Halley, les vapeurs produites par la chute de l'eau sur les feux nitro-sulfurés souterrains pourraient être comparables à ces vapeurs de poudre, et s'élever dans l'atmosphère pour y produire ces trainées dont l'inflammation déclencherait la propagation d'une flamme. Halley résoud ainsi le paradoxe que présente le passage d'un corps solide de dimension considérable (d'après l'observation) et se déplaçant à des vitesses d'ordre de grandeur cosmique (de l'ordre de la vitesse de la Terre dans sa rotation sur elle-même ou autour du soleil), ce qui pose la question de la nature de l'impulsion donnée à cette matière. L'explication s'accorde, au moins qualitativement, avec la nécessaire légèreté de la matière impliquée dans le phénomène, et avec la grande vitesse de déplacement observée. La hauteur du météore, de l'ordre de 60 miles (96 km), ne viole pas fortement les limites communément admises sur la hauteur de l'atmosphère, question sur laquelle Halley a travaillé quand il s'est intéressé à la réfraction et à la pression de l'air. Cette hauteur est supposée ici

représenter l'altitude de condensation des vapeurs sulfureuses en une trainée de matière inflammable, la flamme dans son déplacement ne constituant que la traduction visuelle de cette trainée de matière. Comme pour l'explication proposée cinq ans plus tôt, Halley suppose la condensation des vapeurs par un mécanisme de type « rencontre au hasard d'atomes » inspiré de l'atomisme grec, sauf qu'à présent la condensation a lieu dans l'atmosphère, au lieu de se faire dans l'espace extérieur. Une difficulté signalée par Halley est que, vu la ténuité de l'atmosphère à l'altitude de l'explosion, d'après les expériences de propagation du son réalisées sous vide, ou du moins à très faible pression, on ne devrait pas entendre le bruit de l'explosion.

5. L'explication par l'électricité

5.1 Les prémices

Au milieu du XVIII^{ème} siècle, trente ans après les travaux de Halley, l'idée que les globes de feu constituent un phénomène de nature électrique est popularisée par le physicien hollandais Peter Van Musschenbroek. Cette période, marquée, comme on l'a vu, par le développement très rapide des connaissances en matière d'électricité atmosphérique, porté notamment par des savants tels que Nollet en France, ou Franklin aux Etats-Unis, est particulièrement favorable à l'émergence d'explications de nature électrique pour les météores autres que la foudre. Dans un texte de 1751, Musschenbroek donne explicitement aux globes de feu une origine orageuse, même si on ne les observe pas toujours pendant les orages. Racontant plusieurs témoignages issus d'observations réalisées dans la première moitié du XVIII^{ème} siècle, il cite, sur le même plan, de petits globes de feu, qui ont fait des dégâts matériels, voire humains, et sont à l'évidence des manifestations orageuses, et d'autres qui sont dus à la chute de météorites. Il écrit :

Ne serait-ce pas cette matière de la foudre, qui ne pouvant s'enflammer après s'être rassemblée en trop grande quantité, forme aussi ces globes de feu, qui tombent par leur propre poids du ciel sur les endroits que l'on dit avoir été frappés de la foudre, & qui s'échauffent ensuite si fort qu'ils s'enflamment tout-à-coup, & éclatent alors avec une violence épouvantable, qui produit tous ces désordres affreux que l'on attribue à la chute du tonnerre ? Cela me paraît fort vraisemblable, tant par mes propres observations, que par celles qui ont été faites par d'autres personnes.

On peut le lire à l'entrée GLOBES DE FEU de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751) :

On voit par ce récit, qu'il y a quelques-uns de ces globes qui ne font point de bruit, & d'autres qui en font : ce dernier cas arrive surtout dans les temps orageux. On a plusieurs observations de globes de feu tombés avec bruit dans le temps qu'il faisait des éclairs accompagnés de tonnerre, & souvent ces globes ont causé du dommage [...] La matière de ces globes est évidemment la même que celle de l'électricité.

Concernant les étoiles tombantes, Musschenbroek ne les associe pas aux globes de feu, et pense qu'elles « *doivent leur origine à une matière huileuse, qui a été élevée par la chaleur du jour, qui se condense par le froid, qui retombe par son propre poids & s'enflamme* » (Entrée ÉTOILE TOMBANTE du Nouveau dictionnaire, 1776). Le père Beccaria émet par contre explicitement l'hypothèse d'une origine électrique des étoiles tombantes sur la base d'une observation qu'il en a faite, qu'il rapproche des phénomènes observés au voisinage des cerfs-volants utilisés pour les expériences d'électricité atmosphérique. Priestley (1771) en rapporte le témoignage suivant et l'interprétation qu'en donne Beccaria :

Un jour qu'il était assis avec un ami en plein air, une heure après le coucher du soleil, ils virent ce qu'on appelle une étoile tombante, dirigée vers eux, & qui devint visiblement de plus grande en plus grande, jusqu'au moment où elle disparut à peu de distance d'eux. Leurs visages, leurs mains, et leurs habits, ainsi que la terre & tous les objets voisins, furent alors subitement illuminés d'une lumière diffuse & légère, mais sans aucun bruit.

[...]

Toutes ces apparences étaient évidemment électriques & le P. Beccaria fut confirmé à penser, que l'électricité en était la cause, par la quantité de matière électrique, qu'il avait vu, comme on l'a dit ci-devant, avancer par degré vers son cerf-volant. Car, dit-il, elle avait toute l'apparence d'une étoile tombante. Il vit aussi quelquefois une espèce de « gloire » autour du cerf-volant, qui le suivait quand il changeait de place ; mais qui laissait un peu de lumière, à la vérité, pour fort peu de temps, dans le lieu qu'il venait de quitter.

On trouve à la même entrée du Nouveau Dictionnaire (1776) une argumentation détaillée en faveur de l'hypothèse de Beccaria. Tout d'abord, on observe une circulation de fluide électrique dans l'atmosphère par tous temps et en tous lieux, de la même façon qu'on observe des étoiles tombantes partout et en toutes saisons. Ensuite, les expériences de cerf-volant ont montré que l'atmosphère, à une certaine hauteur, par un temps serein, renferme un feu d'électricité positive abondant, ce qui explique que les étoiles tombantes se forment en haut et se fraient un passage vers l'atmosphère inférieure et la terre, électrisée négativement. Enfin, le mouvement progressif des étoiles tombantes se produit, quelquefois en ligne droite, et quelquefois en zigzag, tout

comme celui du fluide électrique, dont on sait qu'il suit les meilleurs conducteurs, et donc un chemin irrégulier. Pierre Bertholon, dans son traité *De l'électricité des météores* (1787), présente l'explication électrique des étoiles tombantes comme une certitude :

L'électricité seule est le principe de ce phénomène. Si le fluide électrique se trouve accumulé dans quelques petites portions de l'atmosphère, il y deviendra visible, sous la forme de petit globe, d'étincelle ou d'étoile, parce qu'un fluide qui nage dans un fluide de diverse nature, affecte ordinairement la figure sphérique ; & d'ailleurs le petit volume de ce feu & sa distance, empêchant de distinguer les divers angles & les différentes irrégularités qui pourraient l'affecter, lui prêteraient une rondeur qui n'existerait pas, à peu près de la même manière que cela arrive à une tour carrée, qui de loin nous paraît ronde. Mais le fluide électrique n'est pas plutôt accumulé en un endroit, qu'il cherche à se mettre en équilibre ; trouvant alors dans l'atmosphère des portions dispersées de vapeurs aqueuses, qui sont d'excellents conducteurs, il doit se porter successivement sur elles & briller dans tous les intervalles,[...]

L'auteur de l'entrée ÉTOILES TOMBANTES du Nouveau Dictionnaire indique que, lorsque la masse de fluide électrique mise en mouvement est considérable, l'irruption du fluide crée une « *vive lumière* », et fréquemment un grand bruit, dans lequel cas il s'agit d'un globe de feu. Et dans le cas d'une masse plus considérable encore, il s'agit de la foudre observée durant les orages. Et dans le cas d'une masse fragmentée, les fragments étant séparés par des intervalles d'air pur, on s'attend à des irruptions continues qui génèrent une aurore boréale. L'auteur fait enfin remarquer que l'odeur de soufre qui accompagne parfois ces phénomènes peut être liée au fait que des vapeurs sulfureuses sont enflammées par le feu électrique, n'étant donc pas la cause, mais la conséquence des phénomènes électriques.

Cette dernière remarque renvoie à l'idée de Marat précédemment évoquée, à savoir que le feu électrique présent dans l'atmosphère enflamme la matière phosphorique accumulée dans l'atmosphère. On en trouve par exemple une illustration dans le traité sur l'air de Bergmann, paru en 1783, où il écrit notamment :

Dans les marais, les étangs et les rivières, où le sol sous-jacent contient des substances en état de putréfaction, l'air, en remuant le sol sous l'eau, s'élèvera souvent en quantité telle, que mis au contact de tout corps enflammé, il prendra feu à la surface de l'eau. C'est cet air qui, mélangé au reste de l'atmosphère et enflammé par l'électricité des nuages, semble être à l'origine des phénomènes appelés "feux follets" et "étoiles tombantes".

Cette conception se rapproche de la théorie des météores de Descartes, ainsi que de l'explication donnée par Halley (1719) du phénomène des globes de feu, leur trace lumineuse étant assimilée à une flamme se propageant le long d'une trainée de matière phosphorique élevée de la terre par les temps chaud d'été, sauf que ni Descartes, ni Halley, ne pouvaient, à leur époque, imaginer un rôle de l'électricité, encore trop mal connue, dans l'amorçage de la combustion. Elle constitue un compromis entre l'explication héritée d'Aristote, reprise et développée par Descartes, et la nécessité d'admettre l'évidence du lien entre électricité et activité orageuse suite aux expériences de captation de l'électricité atmosphérique menées au début des années 1750. Elle cadre bien avec les idées de Musschenbroek et de Beccaria, unifiant l'explication des différents météores : étoiles tombantes, globes de feu, foudre orageuse, voire aurores boréales, en leur attribuant la même origine électrique pour ce qui concerne leurs manifestations lumineuses, mais en faisant intervenir la présence dans la haute atmosphère de matières inflammables expliquant les manifestations sonores qui leur sont parfois associées, dans les cas où la matière électrique se trouve présente en quantité suffisante (globes de feu, foudre).

5.2 Les théories basées sur l'électricité

Le premier à citer l'article de 1719 de Halley, pour le critiquer, est John Pringle. Dans son article de 1759 des *Philosophical Transactions*, à propos d'un bolide qui a survolé Cambridge en novembre 1758, celui-ci pose huit questions en objection à l'explication de Halley :

- (i) Quelle expérience montre que les vapeurs inflammables sont soumises à la force centrifuge ?
- (ii) Comment ces vapeurs peuvent-elles garder leur volatilité dans les couches supérieures peu denses et froides?
- (iii) Toute matière inflammable, telle que le phlogistique, n'est-elle pas soumise à la gravitation ?
- (iv) Le poids n'est-il pas augmenté par le fluide élastique qui est la cause de l'explosion du météore ?
- (v) La notion de légèreté innée et de *Vis Centrifuga* de la matière ignée ne tient-elle pas au fait que l'air chauffé monte et s'allège donc par dilatation en montant dans les couches plus froides et moins denses ?
- (vi) En présence de la gravité, pourquoi n'observe-t-on pas qu'un objet globulaire sans queue ?

- (vii) Qu'est-ce qui alimente la trainée en feu, puisqu'un fermet est par nature un mélange de substances hétérogènes ?
- (viii) Comment un tel train peut-il être aussi droit sur d'aussi grandes distances, avec une luminosité aussi constante ?

Le bolide en question a explosé à 65 km d'altitude, où l'air est 3000 fois moins dense. Même dans un vide six fois moins poussé, on n'entend pas les sons. Pringle s'intéresse au son de l'explosion. Il cite des expériences qui ont montré que l'intensité de la détonation de la poudre à canon est en proportion de la rapidité avec laquelle l'air intérieur est éjecté, et de la résistance de l'air extérieur. L'air à l'altitude du météore étant peu dense, il faut, dit-il, pour que l'on entende un son, que l'air éjecté soit émis à grande vitesse relativement à l'air environnant, ce qui est le cas, compte tenu de l'énorme vitesse relative. Il écarte sans justification toute analogie avec le tonnerre. Pour Pringle, une détonation ne peut être le résultat que d'une percussion sur un objet dur, ou de l'expansion d'un fluide élastique initialement solide. La texture du météore doit donc être plus dure que celle des exhalaisons, et le fluide élastique brûlant éjecté du météore doit percer une croûte solide, sans quoi il ne peut y avoir d'explosion. Pringle déduit que, vu sa vitesse considérable, le bolide a été conçu avant sa rencontre avec la Terre, puis mis en chute par la gravitation vers le soleil ou tout autre corps attracteur, conclusion très similaire dans sa nature à celle de Halley dans son article de 1714, et à celle de Wallis avant lui. Il écrit pour conclure, mettant clairement les globes de feu au même plan que les comètes :

S'il est alors probable que ces globes de feu proviennent de régions qui sont bien au-delà de la portée de nos vapeurs ; s'ils s'approchent souvent si près de la terre, et ne la touchent que rarement ou jamais ; s'ils se déplacent avec tant de célérité, qu'ils ont à cet égard le caractère de corps célestes ; si on les voit voler suivant toutes les directions, et par conséquent avoir un mouvement propre, indépendant de celui de notre globe ; s'ils peuvent se départir de pareilles quantités d'un fluide élastique, d'une matière phlogistique, et probablement d'un acide, nous ne devons certainement pas les considérer comme indifférents à notre égard, et encore moins comme des masses fortuites, ou des trains d'exhalations terrestres dans les régions éthérées ; mais plutôt comme des corps d'une origine plus noble, tournant peut-être autour d'un centre, formés et régulés par le Créateur dans un but sage et bénéfique, même en ce qui concerne notre atmosphère, qu'ils peuvent, lors de leur combustion, alimenter en une matière subtile et salutaire, ou vider des parties devenues superflues ou nocives pour les habitants de la terre.

Un apport essentiel de Pringle est d'explicitier l'interaction étroite entre la matière du bolide, nécessairement constitué, selon lui, de matière solide pour expliquer le phénomène d'explosion associé, et l'air environnant, dont la résistance qu'elle lui oppose se concrétise par des manifestations sonores. Pringle ne s'intéresse que marginalement à la question du phénomène lumineux, se concentrant sur les manifestations sonores. Mais il est le premier à établir un lien d'interaction de nature « frictionnelle » entre le bolide et l'air qu'il traverse, lien essentiel dans le renversement du paradigme initial aristotélicien de lueurs qui montent par leur légèreté, vers l'allumage provoqué par le contact avec l'atmosphère, idée qui ne s'imposera qu'au début du siècle suivant. Il consacre quelques lignes à l'hypothèse suivant laquelle les globes de feu seraient un type d'éclair atmosphérique, fondée sur leur très grande vitesse de propagation et les bruits d'explosion évoquant le tonnerre qui les accompagnent, pour la rejeter sans plus d'explications.

Thomas Clap est un physicien américain contemporain de John Pringle qui s'est intéressé aux globes de feu, et a établi dans les années 1750 une théorie qui n'a été publiée qu'à titre posthume en 1781. Sa théorie a été diffusée en Europe via des lectures à la *Royal Society* en 1665, deux ans avant sa mort. Clap reprend dans sa théorie les idées publiées par Pringle, notamment sur l'origine extraterrestre des globes de feu, mais essaie de les rendre plus quantitatives. Il donne des arguments supplémentaires en faveur du caractère solide des bolides, notamment le fait qu'ils conservent la même forme après l'explosion, alors qu'ils devraient se désintégrer s'ils consistaient en vapeurs, et leur vitesse considérable, qui les disloqueraient aussitôt s'ils n'étaient que flammes ou vapeurs. Il se démarque cependant de Pringle en avançant une explication de nature électrique à l'explosion fréquemment entendue après la fin du passage du bolide. Celle-ci serait due à la décharge provoquée par la charge électrique considérable accumulée par frottement avec l'atmosphère lorsque le météore passe au plus près de la Terre. Cette idée est probablement dictée par les techniques employées pour générer l'électricité dans les machines de Hauksbee. Le bruit serait dès lors assimilable au coup de tonnerre généré par la décharge, semblable à un éclair. Clap postule que, de la même façon qu'un feu est attisé par l'air d'un soufflet, le feu qui entoure le bolide est attisé, peut-être même spontanément provoqué, par la vitesse relative considérable de l'air rencontré par le bolide. Il signale que la nuit, les balles de gros pistolets, traversant l'air, se réchauffent et peuvent paraître s'allumer. Ainsi, il va plus loin que Pringle en attribuant à l'effet « frictionnel » de l'atmosphère la manifestation lumineuse du bolide, Pringle se limitant, concernant l'effet frictionnel, à ses conséquences sur les manifestations sonores. Mais de ce fait, Clap s'éloigne de l'interprétation

de Pringle, puisque son hypothèse le conduit à attribuer le bruit de l'explosion à l'éclair généré par le bolide se déchargeant dans la terre de l'électricité accumulée lors de son passage dans l'atmosphère.

A partir d'une analyse dimensionnelle, connaissant le rapport des densités atmosphériques entre l'altitude du météore et le sol, Clap calcule des intensités sonores en unités de coups de canon à une distance de référence au niveau du sol, et montre une cohérence d'ensemble entre observation et prévisions. Il calcule également les fréquences d'apparition qui résulteraient de trois comètes terrestres tournant en 30 jours, avec un apogée au niveau de la lune et un périégée vers 20-30 miles (32-48 km), et montre un accord globalement satisfaisant avec les observations. Malgré le caractère très approximatif des calculs de Clap, on ne peut qu'être impressionné par sa démarche de modélisation systématique et de comparaison des données modélisées avec les résultats de l'observation. Il conclut ainsi son mémoire :

Nos observations ont été jusqu'à présent si imparfaites que nous ne pouvons pas facilement déterminer des circonstances précises ; mais la théorie générale semble hautement probable, sinon certaine, selon laquelle ces Météores de grande hauteur sont des corps solides, d'un diamètre d'un demi-mille (800 m), tournant autour de la terre en ellipses allongées, leur plus petite distance étant d'environ 20 ou 30 milles (32 ou 48 km) ; que, par leur frottement sur l'atmosphère, ils émettent un grondement continu, et accumulent le feu électrique ; et que, lorsqu'ils s'approchent de la terre, ou peu après, étant alors en état de surcharge électrique, ils produisent une explosion aussi violente que celle d'un gros canon.

La théorie de Clap, qui est publiée plus de 20 ans après l'article de Pringle, bien que les deux savants aient travaillé à la même époque, semble avoir peu d'impact sur les travaux menés en Europe dans le troisième quart du XVIII^{ème} siècle, qui ne se réfèrent pas à elle. Dans une lettre datée de 1773 écrite à John Pringle, Patrick Brydone fait la relation de son observation d'un globe de feu, et d'étoiles tombantes, ainsi que d'expériences d'électricité réalisées en intérieur, et s'interroge sur une possible origine électrique de ces phénomènes. On trouve dans un mémoire de Jean-Baptiste Le Roy publié en 1774, et relatant le passage d'un globe de feu au-dessus de la France en 1771, une allusion au possible caractère électrique de ces météores. Dans ce mémoire, Le Roy minimise le risque de destruction massive d'installations humaines par ces globes de feu, car « s'ils y descendaient à des hauteurs où l'air se trouvât d'une certaine densité, ils s'y diviseraient nécessairement par la résistance qu'ils éprouveraient de la part de ce fluide, à peu près comme ces nuées qui, en tombant, se réduisent en pluie, par la résistance de l'air

qui s'oppose à leur passage ». Il cite Pringle, qui pense que les globes ne touchent que rarement la terre, car ils sont réfléchis vers l'espace par l'atmosphère, et partage donc son opinion sur les faibles risques de dégâts. A ce propos, il mentionne la confusion faite par Musschenbroek entre globes de feu et foudre globulaire, cette dernière seule étant responsables de dégâts importants constatés. Il s'oppose à l'idée de Pringle, qui fut également celle de Wallis au siècle précédent, assimilant un globe de feu à une comète, et de Halley dans son premier article de 1714, selon laquelle les globes de feu proviendraient de corps permanents extérieurs à la Terre, car, pour lui, l'explosion de ces globes en un grand nombre de parties, dont certaines, enflammées, peuvent descendre jusqu'au sol, s'oppose à l'idée d'un corps solide cohésif. Le Roy compare ces globes « *à cette espèce de fusée volante, qui contenant d'autres petites fusées dans un chapeau, fait son effet en deux temps, la grande éclatant d'abord, & les petites ensuite* ». Commentant l'hypothèse de Halley de 1719 d'une traînée de matière inflammable parcourue par une flamme, Le Roy écrit :

Mais comment expliquer dans cette hypothèse l'inflammation de cette traînée dans des régions si froides ! Comment cette inflammation se fait avec une rapidité si grande qu'elle parcourt six lieues & plus par seconde ! Rien ici-bas, si l'on en excepte l'électricité, ne peut nous donner l'idée d'une inflammation si rapide. Comment imaginer qu'il puisse se trouver dans ces régions une traînée de matière dont toutes les parties se trouvent, dans une si grande étendue, toujours dans la même direction, ou à peu-près !

Il s'étend assez peu sur la possible origine électrique du phénomène, que la structure et la dynamique de la traînée des globes de feu lui paraît appuyer. Mais il reste extrêmement prudent et se garderait bien de pousser plus loin ses « *conjectures en faveur d'une hypothèse qui [...] comporte encore tant de difficultés* », et de conclure, à propos des Anciens :

Il serait assez extraordinaire, & cependant ce temps n'est peut-être pas fort éloigné, qu'on reconnût enfin la vérité de ce qu'ils ont dit autrefois sur cette région de feu, qu'ils avaient placée au-dessus des nuages ; & qu'elle se trouvât être au moins celle où se forment les étoiles tombantes, les globes de feu, les aurores boréales, & autres météores ignés.

Charles Blagden, un physicien anglais, présente en 1784 une théorie purement électrique des globes de feu et des étoiles tombantes, auxquels il attribue une origine atmosphérique. Tout comme Pringle, qu'il cite, il critique l'explication de la traînée de matière inflammable donnée par Halley en 1719. Mais il s'oppose également à l'idée de comètes en orbite terrestre, (i) tout

d'abord parce que ce qui est vu est plutôt un nuage de matière fine en perpétuel changement de forme et d'apparence qu'un corps solide (mais celui-ci pourrait être entouré d'une couche d'atmosphère ou d'électricité), (ii) ensuite parce que, vu le très grand nombre de globes de feu, et surtout d'étoiles tombantes, considérés comme membres d'une même famille, on devrait s'attendre à une foule de comètes terrestres, qui tomberaient donc régulièrement sur la Terre, ou, tout au moins, devraient être observées le jour par les astronomes, ce qui n'est pas le cas, (iii) enfin parce que la vitesse des globes de feu est plus grande que la vitesse maximale d'objets en orbite autour de la Terre, ce qui est d'après lui l'objection la plus sérieuse. Il développe ensuite des arguments en faveur d'une origine électrique du phénomène, (i) l'électricité se déplaçant à grande vitesse, (ii) les manifestations sonores ressemblant à celles des orages, (iii) les aurores boréales présentant certains phénomènes visuels analogues. Il termine ses réflexions par la classification en termes de stratification atmosphérique citée dans l'introduction du présent article.

L'abbé Bertholon, dans son mémoire sur l'électricité des météores (1787), soutient également l'origine purement électrique des globes de feu, en mentionnant notamment une expérience faite en laboratoire de génération d'un petit globe de feu en mouvement le long d'un fil vertical connecté au conducteur d'une machine électrique, et entouré d'un tube de verre destiné à contenir l'électricité à son voisinage.

5.3 Controverses à propos de l'explication par l'électricité

Cette théorie est cependant loin de faire l'unanimité, comme le montrent les réactions à un mémoire publié en 1786 par Antonio Vassali Eandi, disciple de Beccaria, qui attribue au globe de feu qui a survolé Turin en 1784 une origine électrique. Ce mémoire est en effet communiqué pour discussion à trois savants, Jean Senebier, Horace-Bénédict de Saussure et Giuseppe Toaldo, qui émettent des doutes quant à la nature électrique du phénomène, ainsi qu'il est rapporté dans l'Esprit des Journaux (1791). Senebier estime que l'air à l'altitude du météore n'est pas en quantité suffisante pour entretenir la combustion, ce à quoi Vassali répond qu'il ne s'agit pas d'une combustion, mais d'une inflammation électrique, comme on en observe dans le vide de la machine pneumatique. Senebier objecte que, dans ce cas, la décharge électrique devrait être sous la forme de filaments, et n'a pas de raison de prendre une forme sphérique. Vassali répond que l'air très pur de haute altitude, même en faible quantité, confine, en raison même de sa pureté (dénué de vapeurs, donc isolant), le fluide électrique en lui résistant.

Senebier émet d'autres objections, comme le temps long, vis-à-vis du temps très court de propagation d'une étincelle électrique, mis par le météore pour se dissiper, et s'interroge sur les causes du bruit émis, en suggérant qu'il serait dû à un échauffement de l'air. Vassali répond que le globe perd peu de matière électrique à la fois, et qu'il préserve donc un certain temps sa forme et sa taille. Concernant la question du bruit, il juge que l'air ambiant, suffisamment dense pour confiner le fluide électrique, l'est aussi pour propager l'onde sonore. Il ne croit pas que l'échauffement de l'air soit la cause de ce bruit, car il devrait dans ce cas être continu et durer un certain temps, et attribue la cause du bruit de l'explosion à « *une effusion extrêmement vive du fluide électrique qui chasse l'air avec la plus grande impétuosité et produit ou un son bruyant ou un sifflement interrompu* ». Senebier critique également l'idée de Vassali selon laquelle c'est le fluide électrique à l'origine des aurores boréales qui est aussi la cause des globes de feu, puisque, selon Senebier, on ne trouve pas trace d'activité électrique au voisinage du sol durant les aurores boréales, ce à quoi Vassali répond que l'atmosphère supérieure hautement électrique peut ne pas communiquer son électricité aux couches plus basses, notamment si des couches non conductrices dénuées de vapeur s'interposent, ce qui cadre, notons-le, avec les résultats généraux des expériences d'électricité atmosphérique faites à cette époque. Senebier remarque que, contrairement aux globes de feu, qui suivent une trajectoire rectiligne, l'électricité serpente en se propageant, mais Vassali pense que les trajectoires des globes dépendent de la puissance conductrice du milieu dans lequel ils se meuvent, et que les vitesses différentes des globes de feu observés reflètent des différences de puissance conductrice. Pour Vassali, l'électricité ne serpente que si elle traverse successivement plusieurs milieux conducteurs différents.

Senebier dresse, en réponse aux arguments de Vassali, un catalogue d'objections et de questions, auxquelles Vassali tente de répondre :

- (i) Dans un air raréfié, le feu électrique devrait se répandre plutôt que prendre une forme sphérique, ce à quoi Vassali répond que la forme sphérique du météore peut être une illusion d'optique liée à la grande distance du météore.
- (ii) Dans les hautes régions, les vapeurs sont très peu abondantes, et l'électricité qui peut être transportée, nécessairement en très petite quantité. Mais pour Vassali, le fluide électrique pénètre un milieu d'autant plus facilement qu'il est peu dense, et la diminution de la quantité de vapeur avec l'altitude est compensée par la diminution de densité de l'air, le fluide électrique pouvant donc se propager dans un milieu très peu dense malgré la faible abondance des vapeurs.

- (iii) Comment le fluide électrique est-il enflammé ? Vassali attribue au phénomène une origine semblable à celle de la foudre, et pour lui, la foudre peut se déclencher entre des parties inégalement électrique de l'atmosphère, même très au-dessus des nuages.
- (iv) De quelle façon le fluide électrique, se propageant dans l'air sec suivant un chemin unique, peut-il éviter d'être intégralement capté par toute masse d'air humide se trouvant sur son passage, et de quelle façon l'électricité se propage-t-elle dans l'air sec ? Vassali reconnaît la tendance continuelle du fluide électrique à se mettre à l'équilibre, et en conclut que l'air dans lequel se propage le météore doit être uniformément sec et non conducteur.
- (v) L'étincelle tirée d'une batterie se déchargeant en un instant, comment les globes peuvent-ils durer plusieurs minutes ? Vassali répond que l'étincelle tirée d'une batterie ne la décharge pas entièrement, et qu'il faut plusieurs étincelles pour que cela soit le cas.

Le père Louis Cotte, dans son neuvième mémoire sur l'aurore boréale (1788), donne un panorama exhaustif des théories imaginées pour expliquer les aurores boréales, dont la plupart font appel à l'électricité, à la suite des idées exprimées par Canton au milieu du siècle. Il cite notamment Musschenbroek, qui « *regarde l'aurore boréale comme l'effet d'une matière électrique & phosphorique répandue dans l'atmosphère, & qui s'y enflamme* », dont l'avis est partagé par l'abbé Bertholon. Celui-ci énonce ainsi les principes de sa théorie, à savoir :

1.° que l'électricité qui règne partout, est d'autant plus forte & plus abondante qu'on s'élève plus haut ; 2.° que la raréfaction de l'air est en raison de son élévation ; 3.° que plus l'air est rare, plus l'électricité se manifeste sous la figure d'une lumière phosphorique ; 4.° que le fluide électrique se porte naturellement des lieux où il est plus abondant à ceux où il l'est moins ; 5.° que le feu électrique, dans ses différents degrés, paraît blanc, rouge, jaune, &c. ; 6.° que tout feu, toute flamme vue au travers des vapeurs & des exhalaisons, paraît rouge, & surtout la lumière phosphorique ; 7.° que la lumière électrique qui est très-abondante dans les hautes régions, se porte aux Pôles plutôt qu'à l'Équateur, à cause de la force centrifuge qui est moindre vers les Pôles ; 8.° enfin, que le fluide électrique ne se manifeste jamais avec plus de force & d'abondance que dans les temps froids, dans les lieux septentrionaux, & dans les endroits où règne le froid le plus vif. M. Bertholon fait ensuite l'application de ces principes à l'aurore boréale, & il tire une nouvelle preuve de son système, de l'augmentation de l'électricité artificielle dans le temps des aurores boréales, des étincelles électriques qu'on obtient des pointes isolées en l'air, des feux volants & des étoiles tombantes qu'on voit quelquefois sortir du foyer de l'aurore boréale.

On remarque le lien explicite fait par Bertholon entre aurores boréales, feux volants (globes de feu) et étoiles tombantes. Cette détaille également dans son mémoire la théorie élaborée par Benjamin Franklin pour expliquer les aurores boréales, publiée en 1779. Pour celui-ci, les vapeurs chargées d'électricité qui s'élèvent dans la région inter-tropicale migrent vers les pôles, où elles se condensent et tombent sous forme de neige. La couverture de glace des régions polaires ne permettant pas à l'électricité de pénétrer dans la terre, elle s'accumule donc sur la glace, et a tendance à migrer vers le haut de l'atmosphère. Voici ce qu'écrivit Franklin pour expliquer la configuration générale des aurores boréales :

N'est-il pas possible que l'électricité tendant alors à pénétrer dans la terre, & ne le pouvant pas à cause des glaces qui s'y opposent, se reporte en haut, comme dans une bouteille de Leyde surchargée, qu'elle s'ouvre un chemin à travers l'atmosphère peu élevée de ces régions, qu'elle courre dans le vide au-dessus de l'air, & se dirige enfin du côté de l'Équateur en divergeant comme les Méridiens ? L'électricité ne sera-t-elle pas alors très visible dans les endroits où elle sera plus dense, & ne le deviendra-t-elle pas de moins en moins à mesure que la divergence augmentera, jusqu'à ce qu'enfin elle trouve une issue vers la terre, dans les climats plus tempérés, ou qu'elle se mêle avec l'air supérieur, & si la Nature opère de cette manière, n'en résultera-t-il pas toutes les apparences des aurores boréales ?

Après avoir exposé les nombreuses explications données à l'aurore boréale, dont la majorité font appel à l'électricité, cette met cependant en doute le rôle de l'électricité. Tout d'abord, on ne détecte pas de signes d'électricité atmosphérique durant les aurores, alors qu'ils sont systématiques durant les orages. Il invoque aussi les perturbations de l'aiguille aimantée observées durant les aurores, mises en évidence dès 1740 par Anders Celsius et Olof Hiorter. Pour lui, « *si la déclinaison de l'aiguille aimantée était aussi une suite de l'électricité naturelle, on devrait la voir varier irrégulièrement dans les temps d'orage* », ce qui n'est pas le cas, même si dans des circonstances extraordinaires, la foudre peut avoir une influence sur l'aiguille de la boussole. Si l'électricité était responsable des aurores boréales, on devrait observer des aurores par temps d'orage, ce qui n'est pas le cas.

Beccaria a, de son côté, élaboré une théorie des aurores qui revient à remplacer les effluves magnétiques invoquées par Halley, qui ne connaissait pas l'électricité, par le fluide électrique. On peut lire à l'entrée AURORA du *Dictionary of Art, Sciences, and Miscellaneous Literature* (1798), à propos de Halley, s'il avait su qu'une décharge électrique peut polariser une aiguille, ou inverser sa polarité :

[...] *il aurait sans doute conclu que les effluves électriques et magnétiques sont identiques, et que l'aurore boréale était ce fluide qui effectuait sa circulation d'un pôle à l'autre de la terre. En fait, cette même hypothèse est adaptée par S. Beccaria ; et par la supposée circulation du fluide électrique, il explique les phénomènes du magnétisme et des aurores boréales d'une manière parfaitement similaire à celle du Dr Halley, en changeant seulement l'expression "effluve magnétique" en "fluide électrique".*

Néanmoins, le même article pointe que, si l'aurore traduisait une circulation de la matière électrique du nord vers le sud, on devrait observer au sud l'inverse de ce qu'on observe au nord, c'est-à-dire une projection des colonnes de vapeurs électriques du zénith vers l'horizon, ce qui n'est pas le cas. La même objection vaut pareillement pour le cas de la matière magnétique.

L'origine électrique des aurores apparaît donc en cette fin du XVIII^{ème} siècle comme fortement controversée, tout comme celles des globes de feu et des étoiles tombantes. Il existe à la même époque un courant de scientifiques voulant tout expliquer par l'électricité, sur la base de l'analogie faite au milieu du siècle par Nollet, notamment, entre le feu électrique, manifestation du fluide électrique, et l'élément feu, producteur de lumière. Cette assimilation du fluide électrique avec la matière de la lumière conduisent ainsi Antoine Darquier de Pellepoix à juger que « *le Soleil électrise la Terre & toutes les Planètes, comme un plateau de verre électrise le conducteur* », ainsi que le rapporte Cotte. L'abbé Mann, de Bruxelles, attribue à l'électricité, non seulement l'aurore boréale, mais même tous les phénomènes lumineux, la queue des comètes, la Voie Lactée... Le comte Bernard-Germain de Lacépède est celui qui pousse le plus loin cette logique du « tout-électrique » en élaborant une théorie du fonctionnement du soleil, de la terre, et de l'univers entièrement basée sur l'électricité, qu'il détaille dans son très long *Essai sur l'électricité naturelle et artificielle* publié en 1781. Lacépède établit une distinction entre le feu, qui parcourt les corps denses lentement, et le feu électrique qui les parcourt rapidement. Pour lui, l'élément feu, pour donner naissance au fluide électrique, doit s'associer. L'électricité ne présentant aucune affinité avec l'air, ou la terre (qui sont des isolants), elle ne peut s'associer qu'avec l'eau, et cette association se fait nécessairement à l'intérieur de la terre, où le feu et l'eau se trouvent en quantités abondantes. Ainsi, écrit Lacépède, « *je conçois que le feu pur, que ce qu'on a appelé la chaleur du globe, se combine principalement dans le globe même avec des particules d'eau, & y devient fluide électrique* ». Doué d'une vertu expansive, le fluide électrique s'échappe par les endroits où la croûte terrestre lui présente l'obstacle le plus faible, et s'élève dans l'atmosphère, où il est à l'origine du tonnerre, première manifestation de l'électricité naturelle. Le fluide magnétique, d'après Lacépède, résulte de

l'association entre le feu et la terre. Tout corps présent à la surface de la terre renferme une certaine quantité de fluide électrique relative à son degré d'affinité avec lui, l'électricité provenant, soit de l'augmentation de fluide électrique dans un corps par rapport à sa valeur de référence (électricité positive), soit de sa diminution résultant de son accumulation autour du corps (électricité négative). Tout comme d'autres auteurs de son époque, Lacépède attribue aux tremblements de terre une origine électrique. Ils résultent d'après lui d'orages souterrains provoqués par la propagation du fluide électrique. Il écrit, à propos du fluide électrique :

A peine a-t-il été produit, qu'il a ébranlé la terre avec force, bouleversé son intérieur, crevassé sa surface : ses étincelles ont allumé des feux, qui, rompant avec violence les entraves que des rocs énormes & des montagnes pesantes paraissaient devoir donner à leur fureur, ont vomi avec fracas ces obstacles impuissants, & répandu au loin, au milieu de torrents de flammes, la mort & la désolation.

Le fluide électrique ne s'arrête pas à l'atmosphère, son expansibilité l'emportant sur la force d'attraction terrestre, comme le prouve le fait que le fluide électrique puisse sortir de la terre à sa surface. Considérant que la force expansive décroît comme le cube de la distance au centre de la planète, donc plus vite que la force d'attraction, il calcule une distance jusqu'à laquelle le fluide électrique peut s'élever, qui définit le rayon de l'atmosphère électrique de la planète. A partir de considérations sur les distances d'attraction des corps légers par un boulet de fer électrisé, et en appliquant des lois d'échelle, il parvient à calculer les dimensions des atmosphères électriques de la terre (un peu inférieure à la distance terre-lune) et du soleil, comparable à celle de la lumière zodiacale. Il consacre de très longs développements à la perte de chaleur, donc de masse, qui en résulte pour les planètes, se traduisant par un éloignement progressif des planètes du soleil, et en tire des conclusions sur leur évolution thermique, depuis un état chaud initial à un état gelé final. Il explique avec son système un grand nombre de phénomènes, dont les aurores boréales, résultant selon lui de l'accumulation d'une calotte de fluide électrique au-dessus du pôle par le jeu combiné des atmosphères électriques solaire et terrestre. La théorie de Lacépède est bien sûr un exemple extrême et caricatural, qui montre jusqu'à quel point la découverte rapide de l'électricité naturelle durant le troisième quart du XVIII^{ème} siècle a pu stimuler les imaginations et conduire à attribuer à ses effets tous les phénomènes naturels.

Ces excès sont dénoncés par certains savants, comme Volta, qui, dans ses *Lettres sur l'Air inflammable des marais* (1778), raille « ceux qui asservis en esclaves à ce principe dominant,

prétendent que toute étincelle, toute vapeur embrasée, tout feu, toute flamme, tout incendie, n'est autre chose qu'un simple feu électrique » (Cotte, 1774). Il écrit, non sans ironie, proposant de ramener l'électricité à sa juste place :

Si enfin, nous enlevions à l'électricité jusqu'aux éclairs, en les donnant à l'air inflammable, & en ne laissant à celle-là que la fonction moins relevée de les enflammer par le moyen de l'étincelle foudroyante des nuages ; nous prévalant à cet effet de la remarque qu'on peut le plus souvent distinguer très évidemment la foudre dont la flamme est vive & serpentante, & qui est la véritable étincelle électrique, d'avec l'éclair beaucoup moins brillant & plus tranquille, mais qui s'étend à une très grande distance. Quel vaste champ d'idées & de conjectures s'ouvrirait à qui voudrait être rebelle à l'électricité ! quant à moi qui, jusqu'à ce moment, ai toujours été un de ses zélés sectateurs, il m'irait mal de conjurer contre elle, & de vouloir mettre en litige, de quelque manière que ce soit, ses plus anciennes possessions. Je me repens même déjà d'avoir osé avancer, quoiqu'en passant seulement, quelques idées qui heurtent de front, [...], l'orthodoxie électrique.

Sur un plan plus général, passant en revue les différentes hypothèses qui ont été faites pour expliquer les globes de feu et les étoiles tombantes, Ernst Chladni, celui qui a élucidé leurs nature à la toute fin du XVIII^{ème} siècle, remarque très justement dans ses *Réflexions* de 1805 les biais qui ont été ceux de la plupart des savants qui se sont attaqués à la question :

Qu'il me soit permis de remarquer, au sujet des diverses explications de ces météores, combien il est difficile aux savants de se défendre, dans leurs théories, d'une sorte de prédilection pour les diverses branches des sciences qui ont principalement attiré leur attention. Bergmann, qui s'était livré à des recherches sur les aurores boréales, crut y découvrir la cause des bolides. Beccaria et son élève Vassali qui s'étaient principalement occupés d'électricité ont regardé ces globes simplement comme des phénomènes électriques. Lavoisier, à qui l'on doit tant de découvertes sur les fluides aériformes, et Toaldo, en sa qualité de météorologiste, ne veulent y voir que des gaz. Quant aux astronomes Halley, Hevelius et Maskelyne, ils les regardent comme des corps célestes : c'est ainsi que plusieurs minéralogistes, familiarisés avec les phénomènes qu'offrent les contrées volcaniques, regardent comme produites par le feu plusieurs substances que d'autres, moins accoutumés aux volcans, pensent être d'origine neptunienne.

De toutes ces hypothèses, l'électrique est sans conteste celle qui a fait couler le plus d'encre et suscité les plus vifs débats, dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle. Il se sera écoulé près d'un siècle entre l'article précurseur de Halley de 1714, dont l'idée de base d'une origine extraterrestre sera reprise par Pringle en 1759, pour qu'émerge une explication rationnelle des globes de feu et des étoiles tombantes. Un siècle supplémentaire sera nécessaire pour que le

phénomène des aurores soit à son tour élucidé, avec la découverte des précipitations de particules énergétiques solaires.

6. Élucidation de l'origine des globes de feu et des étoiles tombantes

Chladni, dans son fameux article de 1794 (Marvin, 1996), relate vingt événements survenus entre 1676 et 1783. Il décrit des masses de pierre et de fer tombant du ciel et formant des globes de feu en entrant dans l'atmosphère. Ce sont pour lui des corps issus du système solaire, soit qui n'ont pas été soumis à l'accrétion qui a conduit à la formation des planètes, soit qui proviennent de débris de planètes. Il écarte plusieurs explications avancées avant lui : le lien avec la lumière zodiacale, celui avec les aurores boréales, l'idée de nuages ou de trainées de gaz inflammables dans la haute atmosphère, les phénomènes électriques comme les éclairs. Il note que certains ont avancé l'idée de petites comètes, mais on pense alors que les comètes sont transparentes et n'ont pas de noyau solide, ce qui contredit les chutes de météorites, phénomène lié, d'après lui, à celui des globes de feu. Il pense que le chauffage se fait directement par friction entre la surface du bolide et l'atmosphère, et que l'ensemble du corps entre en fusion et se dilate jusqu'à la taille considérable où il est observé. Cette théorie est élaborée très rapidement, Chladni, acousticien à l'origine, n'ayant été initié à cette science que l'année précédente à l'occasion de sa rencontre avec Lichtenberg. Il publie en 1819 un deuxième ouvrage unifiant quatre phénomènes : (i) bolides/ globes de feu, (ii) étoiles tombantes, (iii) pierres tombées du ciel, (iv) masses de métal natif (météorite de Pallas). Entre temps, la pluie de pierres à l'Aigle (1803), pour laquelle l'Académie des Sciences missionne Jean-Baptiste Biot pour établir la vérité, aura confirmé que les pierres tombent bien du ciel, et ne sont pas des pierres locales modifiées par la foudre, sans qu'aucune conclusion, néanmoins, ne soit tirée sur leur provenance.

Chladni s'oppose ainsi à l'ordre aristotélicien, et même à Newton qui écrivait en 1704 :

Pour faire place au mouvement régulier et durable des planètes et des comètes, il est nécessaire de vider les cieux de toute matière, à l'exception peut-être de quelques vapeurs, exhalaisons ou effluves très dilués émanant des atmosphères de la Terre, des planètes, et des comètes, et d'un milieu éthéré extrêmement raréfié.

Se sentant proche du Halley de la première interprétation de 1714, et de savants tels que Maskelyne, qui a publié en 1783 un plan d'observation des météores, objets auxquels il considère qu'on ne prête pas assez d'attention, ou Hévélius, tous deux partisans d'une origine cosmique, il écrit :

De même que les parties terreuses, métalliques et autres forment la substance de notre planète, dont le fer est un des constituants majeurs, et de même aussi que les autres corps célestes se composent de substances semblables, voire des mêmes, quand bien même elles seraient modifiées et mélangées de manières très différentes, de même il doit exister dans l'espace de nombreuses matières grossières assemblées en moindre masses, sans lien immédiat avec de plus gros corps célestes, qui, entraînées par l'attraction ou quelque force motrice, se déplacent jusqu'à passer près de la Terre ou un autre corps céleste et y tomber capturées par leur gravité. À cause de leur mouvement extrêmement rapide, accéléré encore par l'attraction terrestre, de très fortes chaleur et électricité doivent être générées par le frottement intense dans l'atmosphère, de sorte qu'elles parviennent à un état de combustion et de fusion, et que quantité de vapeurs et de gaz s'y développent et dilatent la masse fondue dans des proportions considérables, jusqu'à ce que finalement, lors d'une émission encore plus forte de ces fluides élastiques, elle doive exploser.

D'autres, comme Olbers ou Laplace, les « *lunaristes* », pensent que les météorites proviennent de la lune, d'où elles sont éjectées par des volcans. Biot et Poisson font des calculs montrant qu'un corps éjecté à 2300 m/s de la lune atteint la Terre, et cette hypothèse ne peut donc être rejetée a priori. Chladni, lui, comme Maskelyne et Hévélius, est « *cosmiste* », comme le furent dans l'antiquité Plutarque ou Diogène d'Appolonia. D'autres encore, comme Lagrange, Gassendi ou Musschenbroek par exemple, pensent que les météorites sont des fragments de la Terre mis en orbite par les volcans, et qui finissent par retomber. Concernant les étoiles tombantes, des mesures de vitesse ascendante de certaines d'entre elles vont faire hésiter Chladni sur leur origine, céleste ou terrestre. Après avoir oscillé dans son opinion, il affirmera en 1818 leur origine cosmique, expliquant le mouvement ascendant, selon lui, de certaines d'entre elles, par un effet de rebond sur la couche d'air comprimé créée à l'avant du corps en chute. Contrairement à Blagden, il pense que les étoiles tombantes passent beaucoup plus haut que les globes de feu, là où l'air est très raréfié, et que la raison pour laquelle elles s'éteignent si vite est qu'elles ressortent de l'atmosphère.

Concernant la hauteur de l'atmosphère, question sur laquelle nous reviendrons au chapitre 8, l'affirmation du rôle de l'interaction « frictionnelle » entre le corps solide et l'air environnant

change le paradigme, puisque le sommet de l'atmosphère n'est plus dorénavant la surface où viennent flotter des feux préalablement allumés, ou des vapeurs qui s'y transforment en traînées inflammables, mais celle au-dessous de laquelle le contact à grande vitesse avec l'atmosphère initie la combustion de la matière du bolide à son entrée dans la haute atmosphère. Le mécanisme de chauffage et d'entrée en fusion du matériau des bolides reste néanmoins une énigme. On trouve dans l'entrée URANOLITHE de l'Encyclopédie méthodique (1822) l'exposé du problème tel qu'il se présente : si l'incandescence est provoquée par la fusion du matériau solide, pourquoi cesse-t-elle si brutalement ? De Bellevue explique l'inflammation à la surface par une petite atmosphère pré-existante autour du corps, dont la combustion produirait à la fois la lumière et la vitrification du matériau observées dans les météorites. Lorsqu'une explosion a lieu, la masse éclaterait, non par le développement d'une chaleur interne propre, mais par la diffusion d'une chaleur intense venant au contact de la surface du corps. Les expériences de Porrett (1817) sur la structure des flammes montrent que la combustion des vapeurs se produit dans une zone très chaude enveloppant la flamme visible, l'intérieur de cette flamme étant moins chaud et n'étant pas le siège de la combustion, car l'oxygène de l'atmosphère est consommé dans la zone chaude extérieure et n'atteint pas le centre. Une analogie est faite avec le météore enflammé, qui, tel la partie centrale de la flamme, ne reçoit que peu de chaleur, même après l'ignition de l'enveloppe. Puis la chaleur de l'enveloppe atteint le noyau qui est au centre. Cette conception se rapproche de fait beaucoup de la réalité, à savoir un nuage de plasma entourant un corps central.

Suite à la recommandation de Chladni d'effectuer des mesures trigonométriques à grande base des étoiles tombantes, et sous l'impulsion de Lichtenberg, une campagne de mesures est menée par Brandes et Benzenberg en 1798. C'est la première du genre, malgré les appels à organiser de telles observations faites par certains savants, comme Maskelyne, depuis alors une vingtaine d'années. Ils observent à partir de deux lieux séparés de 14 km. Couchés sur le dos, équipés de montres synchronisées et de quadrants pour mesurer les hauteurs angulaires, ils observent le ciel et consignent leurs observations. Ils vont observer en deux mois 400 étoiles tombantes, dont une vingtaine seulement sont vues par les deux observateurs simultanément. Les altitudes restituées sont comprises entre 14 et 145 km, avec une moyenne autour de 80-90 km, les vitesses estimées étant de l'ordre de 20-30 km/s. La valeur médiane de l'altitude de disparition est de l'ordre de 80 km. En 1820, Farey appelle à des campagnes d'observation systématiques. En 1823, Brandes et ses amis observent 1700 étoiles tombantes, dont 63 simultanément. Les gammes d'altitude et de vitesse estimées sont similaires à celles trouvées en 1798. Il faudra

attendre août 1837, et la pluie de l'essaim des Perséïdes, pour que de nouvelles déterminations soient obtenues par l'équipe d'observateurs montée par Quételet à Bruxelles.

Au seuil du XIX^{ème} siècle, on dispose ainsi d'un premier ensemble d'observations quantitatives des étoiles tombantes, qui viennent s'ajouter aux observations des globes de feu faites au siècle précédent. Toutes ces observations concordent pour indiquer des hauteurs comprises entre, typiquement, 40 km et 160 km. L'électricité n'est plus nécessaire pour expliquer ces météores, mais l'idée demeure néanmoins solidement ancrée, comme le montre par exemple cet extrait d'un cours sur les étoiles tombantes donné par le professeur Baden Powell en 1847 :

Les observations de Brandes, Benzenburg et des autres, comme on le sait, ont attribué de grandes hauteurs à de nombreux météores, variant de 5 à 500 miles (8 à 800 km). Mais M. Quetelet a montré (2e Mémoire, Acad. Bruxelles, vol. xv.) que l'altitude moyenne est de seize à vingt lieues (77 à 96 km), soit dans les limites de l'atmosphère. La majorité d'entre elles peuvent donc devenir lumineuses par combustion. La lumière électrique peut être obtenue dans le vide. Nous pouvons donc avoir différentes gradations d'un même phénomène, allant d'éclairs ou d'explosions purement électriques à grande altitude, à une combustion plus ou moins complète à plus basse altitude, [...].

La problématique de la hauteur de l'atmosphère ne reste pas centrale à celle des étoiles filantes au cours du XIX^{ème} siècle, celle-ci étant reléguée au second plan par celle des essaims météoritiques, dont on découvre au milieu du XIX^{ème} siècle qu'ils sont à l'origine des étoiles filantes. L'identification des essaims, et de leurs comètes parentes, est l'enjeu principal des campagnes d'observation organisées durant la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, notamment par l'astronome anglais William Denning. Les premiers modèles de résistance de l'atmosphère à vitesse supersonique ne sont développés qu'au début du XX^{ème} siècle et conduisent à de premières estimations de la densité de l'atmosphère à haute altitude à partir des nombreuses mesures réalisées par Denning (Lindemann et Dobson, 1923).

7. Conclusions

La caractéristique essentielle de la problématique des globes de feu et des étoiles filantes est la résistance très forte opposés par les tenants de l'origine atmosphérique de ces météores, héritée d'Aristote et de Descartes, durant tout le XVIII^{ème} siècle. Le revirement de Halley, qui suggère en 1714 une origine extraterrestre des bolides sur des arguments scientifiques étayés, et revient sur son opinion cinq ans plus tard, à la suite d'expériences de laboratoire menées sur la poudre

à canon, est emblématique de cette résistance. Il faudra attendre plus de cinquante ans pour qu'un autre anglais, John Pringle, reprenne les premiers arguments de Halley en les approfondissant, pour s'opposer à sa seconde interprétation de 1719. On est frappé par le petit nombre d'articles consacrés au XVIII^{ème} siècle à cette question, la plupart écrits par des savants anglais, ou américains, la communauté anglo-saxonne étant également très investie sur l'étude de l'électricité, avec notamment Benjamin Franklin. L'explication électrique des globes de feu qui se fait jour au milieu du XVIII^{ème} siècle repose pour l'essentiel sur une similitude d'apparence entre l'explosion terminale de ces météores et le tonnerre, et leur très grande vitesse, qui n'a d'équivalent imaginable que celle de la propagation du fluide électrique. Il existe d'autre part à cette époque, dans les témoignages, une confusion entre les globes de feu et ce que nous nommons aujourd'hui la « foudre en boule », phénomène orageux rare conduisant à la formation d'une boule de feu qui peut éclater et occasionner des dégâts matériels et humains, ainsi que le relate par exemple Musschenbroek, qui confond explicitement les deux phénomènes. D'autre part, la figure lumineuse des étoiles filantes se rapproche des halos observés autour des cerfs-volants utilisés dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle pour étudier l'électricité atmosphérique, ainsi que l'avait remarqué Beccaria. Il faudra plus d'un siècle après l'hypothèse faite par Wallis de la nature cométaire des globes de feu, pour que leur origine extraterrestre soit pleinement reconnue, sous l'impulsion de Chladni, et que, tant leur éclat lumineux que leurs manifestations sonores, soient attribuées au frottement entre le corps entrant à grande vitesse dans l'atmosphère et l'air environnant. Et ce frottement, par analogie avec le fonctionnement des machines de Hauksbee, suggère encore le rôle de l'électricité, conduisant Clap à expliquer l'explosion finale par la décharge dans la terre de l'électricité accumulée par le bolide durant sa traversée de l'atmosphère. Une autre raison pour laquelle la théorie électrique des globes de feu a connu tant de succès est que le feu électrique était réputé pouvoir se produire dans le vide, ce qui éliminait la contradiction entre la grande hauteur de certains bolides (supérieure à 100 km) et la hauteur de l'atmosphère telle qu'elle était estimée à partir de la durée des crépuscules. Jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, certains auteurs considéreront que l'éclat des plus hauts de ces bolides ou étoiles filantes, dont ils font l'hypothèse qu'ils sont issus de l'espace interplanétaire, est d'origine électrique. La multiplication des indices en faveur de l'hypothèse électrique, alliée à la tendance à tout interpréter comme un effet de l'électricité dans la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle, explique qu'elle ait été adoptée par la plupart des savants de l'époque, y compris en France. Cette hypothèse, par ailleurs, ne violait pas le dogme cartésien de l'origine atmosphérique de ces météores, comme le montre la théorie purement électrique de Blagden publiée à la fin du

XVIII^{ème} siècle, quelques années seulement avant que Chladni ne vienne définitivement renverser le dogme. C'est donc ici la conjonction d'une théorie crédible, même si controversée (celle de l'origine électrique), et de la résistance exceptionnellement marquée du dogme cartésien de l'origine atmosphérique des bolides, qui retarde l'éclosion de la véritable explication, pourtant pressentie par Wallis dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle, et clairement exprimée par Halley au début du XVIII^{ème} siècle. Le très petit nombre de publications sur la question, surtout du côté français, traduit certainement l'embaras, notamment à cause de la grande hauteur du phénomène, dans lequel celui-ci plaçait les savants de l'époque.

Chapitre 6. Air subtil

1. Introduction

Jean-Jacques Dortous de Mairan, on l'a vu, publie en 1733 sa théorie des aurores boréales (cf chap. 3). Il fait l'hypothèse que l'aurore est provoquée par la précipitation dans la haute atmosphère de la Terre de la matière de l'atmosphère solaire, que la Terre rencontre régulièrement sur son orbite, ainsi que l'implique l'extension angulaire supérieure à 90° de la lumière zodiacale, assimilée à l'atmosphère solaire. Selon lui, cette matière solaire se mélange à la matière de l'air et se stratifie en fonction de ses différents degrés de subtilité. C'est mélangée à l'air qu'elle devient brillante, soit qu'elle le soit par elle-même, soit qu'elle réfléchisse la lumière du soleil. Cette théorie arrive peu après celle de Halley, qui attribue l'aurore à la matière magnétique circulant autour de la Terre, considérée comme un grand aimant, dans la conception élaborée au siècle précédent par Descartes (cf chap. 4). L'altitude des structures caractéristiques de l'aurore, estimée à partir d'observations réalisées par des observateurs éloignés les uns des autres, est selon Mairan comprise entre 400 et 1200 km, donc beaucoup plus élevée que la hauteur de l'atmosphère estimée à partir de la durée des crépuscules (70 km, cf chap. 3) ou de l'estimation de la hauteur des globes de feu traversant l'atmosphère à grande vitesse (typiquement 60 km à 110 km, cf chap. 5). Mais dans un article de 1733, Jacques Cassini, à partir de mesures de pression faites à flanc de montagne, et d'une loi empirique qu'il en déduit reliant la dilatation et le poids comprimant, porte à environ 2000 km la hauteur de l'atmosphère, valeur qui est compatible avec les altitudes typiques des structures aurorales.

Il est néanmoins très difficile pour Mairan d'accepter des valeurs aussi élevées de la hauteur des aurores boréales. Dans le deuxième chapitre de son traité consacré aux mesures du baromètre, Mairan note que l'air à 60 km d'altitude est raréfié d'un facteur 4000, et que d'après la loi de dilatation établie par Edme Mariotte, le degré de raréfaction doit atteindre 8 millions à 120 km. Il mentionne l'article de Cassini précédemment cité, qui suggère un degré de dilatation de l'air à haute altitude supérieur à celui prévu par la loi de Mariotte. Mais, pour expliquer la grande extension verticale des aurores, il fait appel à l'air subtil, une partie très fine de l'air qui passe à travers les pores du verre, et dont le poids n'est donc pas mesuré par le baromètre, puisqu'elle presse le mercure des deux côtés. L'air subtil, moins fin que l'éther, mais plus délicat que l'air grossier dont la pression est mesurée par le baromètre, est susceptible de

s'étendre à une grande hauteur du fait de sa ténuité, même si sa quantité et son poids doivent être considérables. La notion d'air subtil constitue à cette époque une question d'intérêt majeur pour de nombreux savants, suite à plusieurs expériences troublantes réalisées dans les décennies qui précèdent. Mairan en note trois. (i) Tout d'abord les inégalités de niveau du mercure dans différents baromètres qui intriguent l'Académie des Sciences, et que Guillaume Amontons attribue à une différence de porosité des verres de ces baromètres, qui laissent plus ou moins bien passer l'air subtil. (ii) Ensuite la suspension de l'eau purgée de son air réalisée par Huygens une cinquantaine d'années auparavant, puis par Boyle en remplaçant l'eau par du mercure, devant la *Royal Society*, montrant que le mercure purgé peut être suspendu dans un tube renversé jusqu'à une hauteur de 75 pouces (190 cm), presque triple de la hauteur de la colonne équilibrant la pression de l'air grossier. (iii) Enfin l'adhérence spectaculaire de deux marbres polis joints, qu'il faut un poids considérable, bien supérieur à la pression exercée par le poids de l'air grossier, pour séparer. Mairan compare notamment les particules de l'air avec celles de la lumière pour avancer l'hypothèse que les corpuscules de l'air doivent être de tailles variées :

Eh ! comment d'ailleurs cette profonde enveloppe qui fait notre Atmosphère, serait-elle si parfaitement uniforme, qu'il n'y eût dans son tissu ou dans ses interstices, des parties de différente figure & de différente grosseur ? La Lumière, qui est de tous les fluides le plus pur & le plus homogène en apparence, que nous connaissons, en a, & c'est vraisemblablement à la différente grosseur de ses corpuscules, & par-là à leurs différentes vitesses qu'on doit attribuer ses différents degrés de réfrangibilité, & ses différentes couleurs.

Mairan ne mentionne pas dans ce chapitre l'interprétation qu'a donné quelques années auparavant, au tournant du XVIII^{ème} siècle, Bernoulli de la lumière barométrique, encore dénommée *phosphore mercuriel*, découverte par Jean-Félix Picard cinquante ans plus tôt. Cette lumière, qu'on observe dans le tube du baromètre quand on en agite le mercure, est attribuée par Bernoulli à l'air subtil qui, pénétrant les pores du verre, est exposé à la matière du premier élément sortant du mercure qui, en le percutant, génère de la lumière, ainsi que l'a théorisé Descartes. Mairan est cependant très au courant de cette question, qu'il aborde dans son traité sur les *Noctiluques*. Les théories de la cohésion des corps solides par la pression d'une matière subtile incompressible s'étendant jusqu'à de grandes hauteurs, comme celle développée par Claude Perrault à la fin du XVII^{ème} siècle, pointent également le rôle essentiel de l'air subtil. C'est dans ce contexte de Mairan avance l'idée que la matière solaire se mélange avec l'air subtil à haute altitude. Selon lui, le baromètre ne peut donner la hauteur de l'atmosphère, au

sens où l'envisage Mariotte par application de la loi des dilatations, car la loi de répartition verticale de l'air à haute altitude semble différer, selon les mesures faites par Cassini, de celle prévue par Mariotte. Mairan note pour finir que l'atmosphère devrait être plus haute vers l'équateur à cause de la force centrifuge qui en épaissit les couches. Or, le baromètre indique en régions équatoriales des valeurs de la pression de l'air plus faibles qu'à moyenne latitude. C'est pour lui une preuve supplémentaire que le baromètre ne mesure que la partie grossière de l'air, un excès d'air subtil devant être présent vers l'équateur.

Nous allons examiner les différentes raisons, exprimées ou non par Mairan dans le deuxième chapitre de son traité sur les aurores boréales, qui conduisent à postuler l'existence d'un air subtil s'étendant à très haute altitude, à savoir l'inégalité des hauteurs du mercure entre différents baromètres (partie 2), la suspension de l'eau et du mercure au sommet de tubes renversés (partie 3), les théories de la pesanteur et le système de l'impulsion, en lien avec une explication possible de la suspension du mercure (partie 4), enfin les baromètres lumineux (partie 5).

2. Inégalité des hauteurs du mercure entre différents baromètres

Au tout début du XVIII^{ème} siècle, on découvre des différences importantes du niveau du mercure entre différents baromètres. Fontenelle parle notamment d'un baromètre dans lequel le mercure se tient « *18 à 19 lignes plus bas que les autres* » (donc 1,5 pouces, ou 3,8 cm), ce qui intrigue l'Académie (1705). Fontenelle dit que l'exposé de cette anomalie par D Guillaume Amontons à l'Académie suscita plusieurs hypothèses. Pour certains, le verre de ce baromètre pouvait avoir des pores plus grands et laisser entrer « *une matière moyenne entre la matière subtile qui remplit le haut des Baromètres, & l'air grossier que le verre empêche d'y entrer* ». Pour d'autres, le tuyau pouvait avoir « *quelque humidité grasse, dans laquelle était contenu de l'air qui se dilatait beaucoup dès que le vide était fait* ». Pour d'autres encore, « *peut-être ce verre était tel, que le Mercure en corrodaient la substance ; & par-là dégageait de l'air enfermé dans ses cellules, & en effet, en examinant ce verre avec un microscope, ils croyaient le voir plein de bulles* ». Amontons, qui est chargé par l'Académie d'éclaircir la question, est partisan de la première hypothèse, selon laquelle un air de subtilité intermédiaire entre l'air grossier et l'éther entre dans le tube par les pores du verre. Il constate qu'en vidant plusieurs fois le baromètre de son mercure et en le rechargeant, l'écart de hauteur avec les autres

baromètres diminue, ce qu'il attribue à une obstruction croissante des pores du verre par « *une crasse déliée laissée par le mercure* ». A l'appui de son hypothèse, Amontons constate que les bouteilles contenant du mercure se salissent, avec l'apparition d'une poudre noirâtre contre leurs parois intérieures. Il constate également que le lavage du tube à l'esprit de vin fait baisser le niveau du mercure, ce qu'il attribue à la libération de certains pores du tube, qui laissent ainsi entrer davantage d'air subtil. Utilisant un canon à fusil au lieu d'un tube de verre, Amontons trouve que les pores du canon doivent être plus larges que ceux du verre, le mercure s'y tenant plus bas que dans les baromètres de verre. Cependant, selon Fontenelle, « *plusieurs académiciens ne convinrent point du Système de M. Amontons* ». Guillaume Homberg, en particulier, émet l'hypothèse que la baisse du niveau du mercure suite au lavage du tube à l'esprit de vin est liée à la vapeur d'esprit de vin qui s'évapore et presse le mercure, et non à l'ouverture de pores auparavant bouchés. Amontons répond que de si petites quantités de vapeur peuvent difficilement abaisser le niveau du mercure de 18 lignes. De plus, en inclinant le tuyau, des bulles devraient apparaître au sommet du tube, ce qui ne se produit pas. Par ailleurs, deux tuyaux neufs identiques à celui du baromètre atypique, jamais lavés, montrent également un niveau du mercure plus bas, bien que de seulement 6 à 7 lignes.

Amontons détaille ses différentes expériences (1705). Il décrit notamment le système compliqué utilisé pour tester le canon à fusil, qui n'étant pas transparent, nécessite une mesure indirecte du niveau du mercure. Les estimations de la hauteur du mercure réalisées par deux moyens différents ne concordent pas, correspondant, suivant une méthode, à la hauteur observée dans le tuyau de verre, s'en différenciant, suivant l'autre, de 6 lignes. D'après Amontons, « *il ne paraît pas qu'on puisse facilement rendre raison de cette grande différence dans les hauteurs du mercure, autrement qu'en supposant [...] de l'inégalité dans la grosseur des parties de l'air qui composent l'atmosphère, & des pores plus grands dans le fer que dans le verre* ». La mort de Amontons en 1705 ne lui permet pas de mener à terme ses expérimentations. Sa conclusion concernant les pores du fer est acceptée par La Hire (1706). Néanmoins, Maraldi réalise en 1706 de nouvelles expériences qui montrent que le lavage à l'esprit de vin ne modifie la hauteur du mercure que si le mercure est rechargé aussitôt après. Si le tuyau lavé est correctement essuyé et séché, étant exposé plusieurs jours à l'air, le niveau du mercure reste inchangé. Par ailleurs, si on frotte l'extérieur du tuyau à l'esprit de vin pour en déboucher d'éventuels pores, le niveau du mercure ne baisse pas. La conclusion tirée par Fontenelle est que c'est l'air renfermé dans l'esprit de vin qui se détend au-dessus du mercure et le presse :

Et quant à la théorie, on ne peut imaginer autre chose, sinon que les petites gouttes de liqueur, qui ont humecté le dedans du Tuyau, étant raréfiées dans le vide, ou l'air renfermé dans ces liqueurs en étant dégagé, font baisser le mercure. La première idée est la moins vraisemblable, parce que si l'Esprit de vin abaissait par lui-même le Mercure, il l'abaisserait moins que l'Eau de vie, puisqu'il est moins pesant, & l'Eau de vie moins pesante que l'Eau, l'abaisserait moins aussi, & c'est tout le contraire. Il faut donc que conformément à la seconde idée, il y ait plus d'air renfermé dans l'Esprit de vin que dans l'Eau de vie, ou qu'il s'en dégage plus aisément, & ce sera la même chose de l'Eau de vie comparée à l'Eau. Or ces hypothèses sont assez d'apparence.

Mairan, dans son *Traité de l'Aurore Boréale*, juge « *inconséquentes les objections faites aux conclusions de Amontons* ». Il dit ne pas ignorer que « *les Mémoires de l'année suivante 1706, tendent à révoquer en doute cette cause [la différente porosité des verres]* », mais « *puisque tous ces tubes étant chargés et inclinés, le mercure y monte librement, & en touche aussi exactement le bout que dans les verres les plus secs* », « *l'effet de l'esprit de vin ou de l'humidité sur les tubes de Baromètre, ne peut agir que par quelque cause semblable à celle que nous venons d'indiquer, & nullement par voie de ressort et de réaction contre le mercure* ». Son argument est fondé, et la raison de ces différences de niveau du mercure entre différents baromètres apparaît a posteriori obscure.

3. Suspension de l'eau et du mercure au sommet de tubes renversés

La première relation de cette expérience est faite par Christiaan Huygens dans le *Journal des Savants* de 1672. Huygens y décrit une expérience dans laquelle une boule de verre creuse, à laquelle est relié un tuyau de verre d'une vingtaine de centimètres de longueur communiquant avec elle, est remplie d'eau par l'intermédiaire du tuyau, ainsi que le tuyau lui-même, puis renversée sur un récipient contenant de l'eau, en prenant garde de maintenir avec le doigt la boule et le tuyau parfaitement remplis. L'ensemble est placé dans un vaisseau connecté à une pompe qui permet d'en extraire l'air. Lorsque l'eau utilisée est fraîche, l'eau contenue dans la boule et du tuyau descend quand on fait le vide dans le vaisseau, et se stabilise au niveau de l'eau dans le récipient. Mais, réalisant en décembre 1661 la même expérience avec de l'eau préalablement laissée sous vide pendant vingt-quatre heures, donc entièrement purgée de son air, Huygens constate que l'eau reste suspendue dans la boule et ne tombe pas pour se mettre au niveau de l'eau dans le récipient. Si une petite bulle d'air est introduite par le bas, on la voit monter et, parvenue à environ un pouce au-dessus du niveau de l'eau dans le récipient, se dilater

vers le haut, pendant que l'eau s'écoule de chaque côté le long des parois du tube, jusqu'à ce que la bulle emplisse tout l'espace au-dessus de l'eau, dont le niveau tombe à celui de l'eau dans le récipient. Huygens refait en 1663 cette expérience devant la *Royal Society*. Boyle monte une expérience semblable en remplaçant l'eau par du mercure, préalablement purgé de son air pendant trois ou quatre jours, et parvient à suspendre le mercure environ 75 pouces au-dessus du mercure dans le récipient, soit bien au-dessus des 27 pouces de mercure qui équilibrent la pression de l'air grossier. Voici l'explication que donne Huygens de ce phénomène :

Outre la pression de l'air qui soutient le mercure suspendu à la hauteur de 27 pouces dans l'expérience de Torricelli, & de laquelle nous sommes convaincus par une infinité d'autres effets que nous voyons, je conçois encore une autre pression plus forte que celle-là, d'une matière plus subtile que l'air, laquelle pénètre sans difficulté le verre, l'eau, le mercure & tous les autres corps que nous voyons imperméables à l'air. Cette pression étant ajoutée à celle de l'air est capable de soutenir les 75 pouces de mercure & peut-être encore davantage.

Pour Huygens, l'introduction d'une bulle d'air, ou un coup frappé sur le tuyau, font tomber le mercure car l'espace libéré permet à la matière subtile (c'est-à-dire plus subtile que l'air) de s'insinuer entre le mercure et la paroi du tube, se rassembler et peser pareillement sur le mercure à l'intérieur et à l'extérieur du tube. Huygens s'interroge sur la raison pour laquelle la matière subtile, supposée passer à travers le verre et le mercure (ou l'eau quand l'expérience est faite avec de l'eau) n'équilibre pas dès le départ les pressions qu'elle exerce sur le mercure dans le tube et dans le récipient où il est plongé, provoquant la chute du mercure dès le début de l'expérience. Il apporte une réponse, qu'il juge lui-même assez peu satisfaisante, à savoir que la présence de la paroi de verre au contact du mercure limite la force des flux de matière subtile qui passent à travers le verre, du fait de l'étroitesse de ses pores, et pressent moins le mercure se trouvant au contact du verre dans le tube, qu'à l'extérieur, où la surface est libre de tout obstacle.

A l'appui de son explication, il cite des expériences d'application de deux plaques de métal, ou de marbre, l'une contre l'autre. On trouve dans le Journal des Savants de 1679 la relation d'une telle expérience faite à Leiden aux Pays-Bas par un certain Ryck, dans laquelle, ayant joint deux plans polis d'environ 6 centimètres de dimension, on a trouvé que le plan inférieur pouvait maintenir en suspension un poids de 580 livres, un poids de 590 livres étant requis pour séparer les deux plans. Ces plans avaient préalablement été enduits de suif de chandelle avant d'être joints, mais l'auteur signale qu'un joint probablement plus efficace à base de « *suif de mouton*

cru, pilé avec des feuilles vertes de chêne ou d'ormeau » aurait permis d'atteindre des résistances à la séparation encore plus fortes. Huygens explique que l'adhésion reste forte, même après avoir fait le vide autour des deux plans au contact, ce qui montre que la force de pression exercée par l'air grossier n'est pas seule à l'origine de l'adhérence constatée, et joue en faveur de l'action d'une matière plus subtile que l'air exerçant sa propre pression. Huygens cite enfin le siphon à jambes inégales qui permet de vider l'eau d'un bassin à l'aide d'un tuyau qui passe au-dessus du niveau de l'eau dans ce bassin, ce qui d'après lui implique également la présence d'une matière subtile exerçant sa propre pression.

Huygens cite dans les termes suivants cette expérience dans son *Traité de la Lumière* paru en 1690 :

Par la pression de dehors, dont j'ai parlé, il ne faut pas entendre celle de l'air, qui ne serait pas suffisante, mais une autre d'une matière plus subtile, laquelle pression se manifeste dans cette expérience que le hasard m'a fait rencontrer, il y a longtemps, savoir de l'eau purgée d'air, qui demeure suspendue dans un tuyau de verre ouvert par le bout d'en bas, nonobstant que l'air soit ôté du vaisseau où ce tuyau est enfermé.

L'on peut donc de cette manière concevoir la transparence sans qu'il soit besoin que la matière éthérée, qui sert à la lumière, y passe, ni qu'elle trouve des pores pour s'y insinuer. Mais la vérité est que cette matière non seulement y passe, mais même avec grande facilité, de quoi l'expérience de Torricelli, dessus alléguée, est déjà une preuve. Parce que le vif argent & l'eau, quittant la partie haute du tuyau de verre, il paraît qu'elle est remplie aussitôt de la matière éthérée, puisque la lumière y passe.

La suspension de l'eau lui sert ainsi à prouver que la matière éthérée, qui est le support de la propagation de la lumière, pénètre les pores du verre, et remplit donc l'espace au-dessus de l'eau, ou du mercure, quand ceux-ci quittent la partie haute du tuyau. Il présente dans son essai un autre argument en faveur de la porosité du verre à la matière éthérée : si l'éther ne traversait pas le verre, une sphère creuse de verre, qui contient de l'air et de la matière éthérée, devrait résister du fait de son poids au mouvement qu'on veut lui imprimer (donc lui opposer de l'inertie), comme si elle était remplie d'eau, ou de mercure. Or, cela n'est pas le cas, et on peut en conclure que la matière éthérée « *coule à travers [le verre] avec une très grande liberté* ».

Jacques Rohault, dans son traité de physique (1671) aborde la question de la matière subtile et de la porosité du verre, en relation avec les expériences de suspension précédemment décrites.

Du fait que l'on peut toujours, si une seringue n'est pas trop grosse, en tirer le piston « *sans beaucoup de difficulté* », Rohault conclut « *qu'il y a des pores dans le corps de la seringue ou du piston, ou plutôt dans tous les deux, & qu'entre les parties grossières de l'air, il y en a quelques autres plus délicates, qui peuvent passer par les pores de la plupart des corps terrestres* ». En effet, s'il n'y avait pas de pores dans le corps de la seringue ni dans le piston, il dit qu'il serait « *impossible de tirer le moins du monde le piston ; parce que le monde étant plein, l'air que devrait pousser le piston ne pourrait trouver de place où se retirer* ». Pour lui, on peut tirer le piston car il existe des parties plus subtiles de l'air qui peuvent entrer dans la seringue et venir remplir le vide qui se crée à l'intérieur. Si on relâche le piston après l'avoir tiré, il revient dans sa position initiale du fait de la pression exercée par l'air grossier qui le repousse, l'air subtil étant chassé de la zone comprimée par le piston. Pour Rohault, comme pour Descartes, l'espace libre au-dessus du mercure dans le tube du baromètre n'est pas vide, puisque la lumière peut le traverser, et il est rempli de matière subtile. Cette substance ne peut en effet pas être l'air grossier qu'on respire, puisque de petits animaux enfermés dans des tubes évasés au-dessus du mercure meurent rapidement par asphyxie. Rohault pense que la matière subtile qui remplit le haut du tuyau passe par les pores du verre plutôt que par ceux du mercure, qui semble trop pesant, avec des pores trop petits, pour la laisser pénétrer. C'est ce que montre d'après lui l'expérience de suspension du mercure faite récemment en Angleterre, en l'occurrence par Boyle suite aux premières expériences de Huygens, qui suggère que le mercure purgé de son air ne laisse pas passer la matière subtile, contrairement au mercure non purgé dont la chute dans le tube prouve, qu'au contraire, la matière subtile le traverse. Mais Rohault, qui n'a pas encore fait l'expérience lui-même, estime qu'il faut attendre avant d'en tirer des conclusions définitives.

Rohault mentionne l'expérience de la larme de verre, issue du refroidissement rapide d'une goutte de verre en fusion, qui, si on la brise par l'extrémité, se réduit en poudre. Pour lui, les parties externes de la goutte se refroidissant brutalement, leurs pores se contractent en s'accommodant à « *la petitesse des parties les plus délicates de la matière subtile* ». Les couches sous-jacentes se refroidissant plus lentement, les pores vont s'agrandissant vers l'intérieur. Aussi, lorsqu'on brise la larme de verre par l'extrémité, la matière subtile s'engouffre à l'intérieur et rencontre d'abord de grands pores qui laissent passer ses parties les plus larges, celles-ci ne pouvant pénétrer les pores plus étroits des parties extérieures, qu'en conséquence elles font éclater en mille morceaux.

On retrouve ces idées sur l'air grossier et l'air subtil exposées dans le *Système de Philosophie* de Pierre-Sylvain Régis, publié en 1691. Pour Régis, comme pour Rohault, tous deux étant des cartésiens fidèles, « *l'Air voisin de la Terre est composé de deux parties, dont l'une s'appelle la partie grossière & l'autre la partie subtile de l'Air* ». L'air que l'on fait sortir par pompage dans la machine du vide est la partie grossière de l'air, et il est remplacé par l'air subtil « *accompagné de la matière du premier & du second élément* ». L'air raréfié résultant du mélange de l'air grossier et de l'air subtil « *ne diffère de l'air ordinaire que parce qu'il est plus rare & qu'il ne fait pas tant le ressort ; en effet, on y remarque les effets qui sont propres & particuliers à l'Air tel qu'est la propagation du son, qui quoique faiblement ne laisse pas de se faire entendre au travers de ce vide apparent* ». Régis cite également l'expérience de suspension du mercure, qu'il a visiblement réalisée lui aussi, en expliquant qu'en l'absence d'air « *qui puisse monter en haut du tuyau pour contrebalancer par son ressort le poids de l'Air extérieur, cet Air agissant de toute sa force contre le Mercure, le peut tenir suspendu à la hauteur de 50 pouces* ».

Dans un article paru en 1672 dans les *Philosophical Transactions*, dont la traduction française a été publiée en 1745 dans la *Collection Académique*, John Wallis discute les résultats des expériences faites par Huygens, Boyle et plus récemment lord Brounker, président de la Royal Society. Wallis dit ne pas se prononcer sur l'existence, ou non, d'un vide absolu, ni sur la nature exacte de l'air que nous respirons :

Par conséquent, lorsque je parlerai du vide produit dans l'expérience de Torricelli, ou par quelque autre moyen de cette espèce, je déclare expressément [...] que je ne parle pas d'un vide absolu, dont je ne m'amuserai pas à discuter l'existence, mais de l'absence de ce mélange hétérogène, que nous appelons air, tel que celui dans lequel nous respirons ; sans disputer contre le pur Éther d'Hobbes, ou contre la matière subtile de Descartes, & de Huygens, comme inutile à la question présente.

Wallis indique que Huygens attribue à un air subtil la suspension du mercure au-dessus de 28 pouces dans l'expérience faite par Boyle, mais quelle est la pesanteur de cet air subtil ? Brounker s'est proposé de trouver la hauteur à laquelle le mercure est suspendu par l'air subtil, mais il n'a pas mené à terme ses expériences. Wallis trouve l'explication de Huygens peu satisfaisante, car si l'air subtil pénètre le verre, il doit presser le mercure autant à l'intérieur du tube qu'à l'extérieur. C'est précisément l'objection à laquelle Huygens a tenté de répondre, en arguant d'une perte d'impulsion de l'air subtil à la traversée du verre, tout en reconnaissant lui-même que son argument n'est pas totalement satisfaisant. Wallis note en particulier que le

même obstacle du verre existe dans le cas d'un mercure non purgé de son air, et que dans ce cas le tuyau se vide dans sa partie supérieure. D'autre part, en admettant même l'argument de Huygens, le mercure devrait descendre graduellement dans le tuyau quand la suspension est interrompue par un choc ou l'introduction d'une bulle d'air, puisque l'air subtil traverse le verre avec difficulté, alors qu'au contraire il tombe d'un bloc. Par ailleurs, Wallis ne comprend pas pourquoi, suivant l'explication de Huygens, la matière subtile seule n'a pas assez de force pour séparer le mercure du verre, un choc ou une bulle étant nécessaire pour amorcer la formation d'un espace où la matière subtile puisse se rassembler et commencer à peser, alors que précisément le mercure ne présente aucune affinité particulière avec le verre et s'en sépare sans aucun effort.

Wallis avance deux explications possibles. La première tient pour lui à l'élasticité de l'air, l'introduction d'une bulle d'air induisant une poussée sur le mercure susceptible de déclencher sa chute. Wallis fait référence à la question, alors très débattue, du « *système de l'impulsion* ». Faut-il une impulsion extérieure pour mettre la matière (ici le mercure) en mouvement sous l'effet de la force de pesanteur, ou bien la gravité est-elle une tendance naturelle qui met d'elle-même la matière en mouvement ? Est-il possible que le mercure, pour descendre sous l'effet de la force de pesanteur, doive subir une impulsion extérieure, telle que celle provoquée par une percussion sur le tube, ou l'introduction d'une bulle d'air au sommet du tube ? Nous verrons dans la section suivante que ce problème est âprement débattu dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle, et au début du XVIII^{ème} siècle, et que Wallis propose justement d'y répondre par une expérience sur la suspension du mercure, qui permettrait de trancher entre cette hypothèse et celle de Huygens : à savoir la mise en évidence d'un état dans lequel le mercure resterait suspendu à 75 pouces ou davantage, donc bien au-dessus des 27 ou 28 pouces dus à la pression de l'air grossier, mais avec un espace vide au-dessus de lui, alors que dans les expériences réalisées, le mercure reste toujours collé à l'extrémité supérieure fermée du tube. Cela confirmerait la nécessité de l'impulsion extérieure, et en même temps invaliderait l'explication de Huygens, puisque cette configuration prouverait que l'air subtil ne profite pas de l'espace libre laissé au-dessus du mercure pour se rassembler et se mettre à peser sur le mercure et le faire tomber.

La deuxième explication proposée par Wallis est que l'air hétérogène est composé de parties qui ont du ressort, et d'autres qui, tout en étant pesantes, n'en ont pas. On verra que cette idée d'un air subtil inélastique, responsable de la cohésion des corps solides, est très présente dans

la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle. Si le mercure n'est pas purgé de son air, l'air rejeté par le mercure dans la partie supérieure du tube équilibre parfaitement la matière élastique de l'air extérieur, et la colonne de mercure équilibre donc la partie non élastique, sans ressort, de l'air. Si le mercure est purgé, et qu'il n'y a pas d'air élastique au-dessus du mercure (configuration des expériences de Huygens et Boyle), la colonne de mercure équilibre à la fois les parties élastiques et non élastiques de l'air extérieur, et elle est donc plus élevée. Dans cette explication, la hauteur du mercure dans le baromètre traditionnel donne le poids de la partie non élastique de l'air, conclusion dont il faut noter qu'elle semble aller contre les lois de l'élasticité de l'air établies à la même époque par Boyle et Mariotte.

Mariotte, dans son second essai sur la nature de l'air datant de 1679, aborde brièvement cette question de la suspension du mercure, expérience qu'il a lui-même réalisée, mais il en propose une explication différente de celle avancée par Huygens qui invoque l'air subtil, car précisément cet air subtil, se coulant entre le verre et le mercure, devrait au contraire détacher le mercure de la paroi du tube :

Cette hypothèse se confirme lorsqu'on réitère plusieurs fois la même expérience avec le même mercure, ou avec d'autre qu'on a laissé longtemps dans la machine du vide. Car enfin ce mercure se purge entièrement de la matière aérienne, ou du moins celle qui reste n'est pas encore disposée à se remettre en air : & alors, si on emplit de ce mercure un tuyau de 40 ou 50 pouces de hauteur, & qu'on mette si exactement le doigt sur le bout ouvert, qu'il ne demeure point du tout d'air dans le tuyau, & qu'on fasse l'expérience bien doucement ; le mercure ne quittera point le haut du tuyau, quoiqu'on ôte le doigt, mais il demeurera entièrement suspendu, ce qui n'arriverait point, s'il y avait de la matière subtile qui pût se couler entre deux.

J'attribue cet effet à la contiguïté naturelle de tous les corps, & à la loi ou règle de la nature, par laquelle les corps contigus ne se séparent point, ou résistent à être séparés, si quelque autre corps ne se glisse entre deux. Et parce qu'alors la matière aérienne est épuisée, & qu'il n'y a point d'autre air ou d'autre matière qui puisse se mettre entre le haut du tuyau, & le mercure; il ne descend point : il est vrai que, si on donne un grand coup contre le tuyau, le mercure tombe, parce que quelques particules de la matière aérienne qui n'étaient pas encore disposées à se mettre en air, s'y disposent par le choc.

Il explique de la même façon la cohésion forte entre deux pièces de marbres jointes, ainsi que le principe du siphon à jambes inégales.

Hooke, en 1684, présente sa conception et le résultat de ses expériences de suspension du mercure. Il voit, comme Huygens, « *la nécessité absolue d'un fluide comprimant beaucoup plus subtil que l'air, et pourtant constitué de parties d'un volume déterminé, qui traverserait et pénétrerait facilement les pores du verre, de l'eau et d'autres corps imperméables à l'air* ». Il compare ce fluide exerçant une pression à une liqueur dans laquelle l'air est dissout comme une teinture dans l'eau. Ce fluide possède une plus ou moins grande congruence aux corps qui lui sont contigus, suivant qu'il les pénètre facilement (corps dit « homogène ») ou difficilement (corps dit « hétérogène »). Ce fluide est beaucoup plus pesant que l'air, et n'a pas nécessairement de ressort. Il réalise une expérience, que l'on qualifierait aujourd'hui d'analogique, en simulant les pores du verre par un fagot de tubes très fins dont il ferme le sommet d'un tube de verre. Il immerge le tube et son plafond poreux dans un récipient contenant une eau purgée de son air et, soulevant l'ensemble, constate que l'eau reste en suspension dans le tube, s'élevant de plusieurs pouces au-dessus de la surface de l'eau du récipient. Il explique le phénomène par le fait que l'eau est plus congruente au verre qu'à l'air, celui-ci ne pouvant forcer le passage qu'à l'aide de la gravité du cylindre d'eau situé au-dessus de la surface libre de l'eau dans le récipient lorsqu'il atteint une hauteur suffisante. Il fait une expérience analogue avec du mercure à l'aide d'un bouchon de cuivre creusé d'un grand nombre de petits trous simulant les pores, et trouve un résultat qualitativement similaire : le mercure reste suspendu jusqu'à une hauteur de plusieurs pouces au-dessus de la surface libre du mercure dans le récipient où est plongé le tube. Il renouvelle cette expérience en immergeant le dispositif à mercure précédent dans une bassine remplie d'eau, et constate que le mercure monte plus haut quand le système est immergé dans l'eau, que quand il se trouve dans l'air. Dans cette dernière expérience, l'eau représente l'air de l'atmosphère, et l'air extérieur la matière subtile. La hauteur du mercure avant immersion dans l'eau donne le poids de la colonne d'air (la matière subtile suivant l'analogie faite), celle après immersion le poids de la colonne d'air plus celui de la colonne d'eau (l'air suivant la même analogie). Selon Hooke, ces expériences permettent d'envisager de mesurer la puissance requise pour forcer une liqueur (ici l'air) à passer au travers des pores de différentes grosseurs d'un solide hétérogène, remplis d'une liqueur homogène à ce solide (ici l'eau, ou le mercure). Il se propose de refaire des expériences analogues avec des verres de différentes natures, ainsi que d'autres substances comme le plomb ou l'argent, pour évaluer en fonction de la hauteur de la colonne jusqu'à laquelle l'eau ou le mercure restent suspendus la taille des pores de ces substances relativement à ceux du verre.

Musschenbroek, dans le chapitre *De l'Air* de son *Essai de Physique* (1726) fournit une explication assez similaire à celle de Mariotte en termes de cohésion entre les parties du mercure, ainsi qu'entre le mercure et le verre :

[...] mais les particules du Mercure s'attirent aussi les unes les autres avec beaucoup de force, de sorte que celles, qui se trouvent à quelque distance du Verre, restent suspendues à celles qui la touchent immédiatement ; & d'autres qui en sont plus éloignées, tiennent à celles qui le sont moins, d'où il arrive que la Colonne entière de Mercure reste attachée au Verre. Lors donc qu'on frappe un peu le Tuyau, ou qu'on le secoue, en sorte que les particules du Verre commencent à trémousser, le Mercure s'en détache & s'en sépare avec violence, & lorsqu'il s'en trouve un peu éloigné, il n'est plus attiré avec la même force qu'auparavant, & il faut de nécessité que sa pesanteur le fasse tomber.

Il dit ne pas croire à l'effet de l'air subtil. D'après lui, l'air subtil, plus subtil que la lumière, passe nécessairement à travers les pores du verre. On constate par ailleurs, en approchant un charbon ardent du tube, que le mercure à l'intérieur est chauffé. Ainsi le feu, moins délicat que l'air subtil, pénètre-t-il les pores du verre jusqu'au mercure. Concernant l'eau, dans l'expérience de Huygens, la lumière la traverse tout autant que le verre, montrant que l'air subtil doit agir sur la surface supérieure de l'eau comme si elle ne touchait pas le verre. Ainsi, l'air subtil passe-t-il partout dans le dispositif, et ne peut-il expliquer le phénomène de suspension observé.

Mairan, dans son traité de l'aurore boréale publié en 1744 (seconde édition) s'élève contre l'explication en termes de contiguïté naturelle des corps, telle qu'énoncée par Mariotte, qui lui semble intenable, pour la bonne et simple raison que l'adhérence entre les parties du mercure lui semble incapable de maintenir le mercure en suspension :

Car pour ne parler ici que de l'expérience du Baromètre répétée plusieurs fois à Londres par M. Boyle, & devant M. Huygens, je consens qu'on accorde à l'adhésion, ou, si l'on veut, à l'attraction réciproque des parties contigües du mercure & du verre une aussi grande force qu'on voudra, & capable de tenir la surface extérieure de l'un collée contre la surface inférieure de l'autre, malgré le poids d'une colonne qui excède de 47 pouces celle qui fait équilibre à l'air grossier, qui n'est que de 28. J'y consens, parce qu'aucun fait connu ne peut nous servir à déterminer cette prétendue force. Mais il n'en est pas de même de l'adhésion du mercure au mercure ; ce n'est pas ici un corps tout d'une pièce : nous savons, ou plutôt nous voyons que la plus petite force suffit pour faire glisser les parties de ce fluide les unes sur les autres ; & s'il fallait la comparer avec le poids d'une colonne de 47 pouces, nous la trouverions plusieurs milliers de fois au-dessous.

Imaginant par la pensée un cylindre de mercure intérieur au cylindre total au contact de la paroi du tube, comment le cylindre intérieur pourrait-il ne pas glisser vers le bas ? Pour Mairan, partisan de l'explication par l'air subtil, les parties du mercure en suspension bouchent les pores du verre, et cela d'autant plus que le mercure est purgé de son air. La présence d'air grossier dans le mercure « *peut donner un libre passage à l'air subtil* », de même « *qu'un corps déjà mouillé & imprégné d'eau, peut être plus aisément pénétré par une autre liqueur aqueuse que s'il était sec* », ce qui explique que le mercure non purgé de son air ne reste pas suspendu, contrairement à l'air purgé.

L'explication de la suspension du mercure par les forces de cohésion tenant ensemble les parties du mercure, ainsi que les parties du mercure et celles du verre, telle qu'affirmée par Mariotte, et reprise par Musschenbroek, s'intègre bien dans les idées de l'époque sur les causes de la dureté des corps solides. On trouve une description détaillée de cette théorie dans les *Essais de Physique* de Claude Perrault (1680). Perrault fait l'hypothèse que :

[...] l'air voisin de la terre & dont nous avons l'usage & la connaissance, est composé de trois parties mêlées ensemble, dont j'appelle l'une la partie Grossière, l'autre la partie Subtile, & la troisième la partie Éthérée. La partie Grossière est un amas de petits corps médiocrement subtils, médiocrement pesants, & capables d'une grande compression. La partie Subtile est un amas de corpuscules beaucoup plus subtils & plus pesants que ceux qui composent la partie grossière, mais qui sont tout à fait incapables de compression. La partie Éthérée est encore incomparablement plus subtile que les deux autres, mais elle n'a point de pesanteur, étant elle-même la cause de la pesanteur des autres corps.

On retrouve l'air subtil, intermédiaire entre l'air grossier et la matière éthérée, beaucoup plus pesant que l'air grossier, mais inélastique. Les parties de l'air subtil et de l'éther sont sphériques et extrêmement déliées, formant un fluide car les corpuscules ne s'attachent pas les uns aux autres. Les parties grossières de l'air et des autres corps peuvent être sphériques, ou cubiques, avec des surfaces plates par lesquelles elles peuvent s'attacher ensemble :

[...] les corpuscules, dont les choses dures & solides sont composées, ont de si petits intervalles, & sont serrés de si près les uns contre les autres, que les corpuscules de la partie subtile de l'air ne sont quelquefois pas assez subtils pour s'insinuer dans ces intervalles : mais cela ne doit être entendu que de certaines parties qui sont extrêmement compactes dans chaque corps solide, n'y ayant point de corps solides qui n'aient des inégalités & des parties moins serrées, au travers desquelles cette partie subtile trouve moyen de passer.

L'air grossier est élastique, car chaque corpuscule a du ressort. Perrault note que des gouttes d'eau ou de mercure, quand on fait le vide dans une enceinte, conservent leur forme sphérique, ce qu'il attribue à la pression exercée par l'air subtil, qui vient remplacer l'air grossier en passant par les pores de l'enceinte. Il dit, concernant l'incompressibilité de l'air subtil :

Cette qualité est une suite nécessaire des autres que l'on y suppose : Car de même que la partie grossière est compressible, parce que chaque petit corps qui la compose étant composé de corpuscules joints ensemble par quelques endroits, & séparés par d'autres, il s'ensuit que les parties éloignées peuvent se rapprocher & celles qui sont jointes se séparer ; et c'est là la manière qui rend un corps compressible. Par la même raison, la partie subtile ne saurait être comprimée, parce que n'étant composée que de corpuscules sphériques tous d'une même espèce, ils sont toujours joints autant qu'ils le peuvent être les uns aux autres par leur pesanteur, outre que leur nature indivisible, c'est-à-dire incapable d'être actuellement divisée ou rompue répugne absolument à la séparation des parties laquelle est requise pour la compressibilité.

Pour Perrault, « des corps qui ont des faces plates & polies se peuvent approcher d'assez près par ces endroits, pour faire que d'autres corps quoique très petits ne le soient pas encore assez pour s'introduire entre ces deux faces, qui sont jointes si exactement ». La « réunion des parties dont les corps durs & qui font ressort sont composés » obéit à deux principes : (i) un principe interne, qui fait que les faces plates peuvent se joindre, et sont d'autant plus difficiles à séparer qu'elles sont « plates et polies », et (ii) un principe externe, celui de la pesanteur des parties subtiles de l'air qui est arrêtée par la « solidité impénétrable » des corpuscules, poussant et attachant les corpuscules « par l'effort de l'impulsion que cause la pesanteur ». « Ayant une étendue immense au-dessus de nous, & étant composée de parties qui se touchent immédiatement, qui ont de la pesanteur & qui sont incapables de compression, elle [la partie subtile de l'air] s'oppose à cette séparation, & y fait plus ou moins de résistance à proportion de la grandeur & du nombre des parties qui doivent être séparées ». La difficulté pour séparer deux corps polis joints est proportionnée à la superficie de la zone de contact entre ces corps. L'incompressibilité de l'air subtil est une propriété absolument nécessaire pour expliquer que les corps durs soient empêchés par elle de se diviser. Perrault distingue contiguïté et continuité, celle-ci consistant en « la jonction des corps dont les parties se touchent par autant de faces plates qu'il est possible, & [ne différant] de la contiguïté [...] qu'en ce que la contiguïté n'est la jonction que de très peu de faces plates ». Deux corps polis joints se séparent plus aisément dans l'air que dans l'eau, et d'autant plus difficilement qu'ils sont

immergés profondément dans le mercure, ce qui montre que la pesanteur de la partie grossière de l'air, moins grossière néanmoins que celle du mercure, ou celle de l'eau, serrant deux corps polis, rend leur séparation difficile. Pour Perrault :

[...] la Dureté des corps peut être attribuée à la compression par laquelle un corps pesant & fluide agit sur les corpuscules dont les corps sont composés, de la même manière que l'on voit que le mercure & l'air grossier agissent sur les corps dont les faces sont plates & polies.

On peut donc concevoir que tous les corps sont serrés les uns contre les autres, avec une force qui est égale à la pesanteur de toute la partie subtile de l'air, qui apparemment s'étend infiniment par-delà la partie grossière que nous respirons.

Ainsi, l'air subtil incompressible, qui assure la cohésion des corps durs, s'étend bien au-delà de l'air grossier. C'est l'air subtil qui, pesant sur l'air grossier, est responsable de son élasticité, en cela qu'il plie les particules de ce dernier et les force par sa pesanteur à revenir à leur premier état. Ainsi l'air subtil n'agit pas sur toute la masse de l'air grossier, mais seulement sur les parties solides dont chaque particule d'air grossier est composée. C'est la pression de la partie subtile de l'air, pénétrant le mercure, qui est responsable de la dureté du verre, et non la pression de l'air grossier. Du fait que les corps solides transportés en altitude ne montrent aucune variation de dureté, contrairement à la pression de l'air grossier mesurée par le baromètre, qui diminue fortement sur les montagnes, Perrault déduit la très grande hauteur et l'énorme pesanteur de l'air subtil comparé à l'air grossier :

Il faut encore concevoir que la pesanteur de la partie subtile est sans comparaison plus grande, que la pesanteur de la partie grossière, ainsi qu'il a été dit ; Et que par conséquent il ne faut pas trouver étrange que la puissance qui est capable de surmonter la pesanteur de la partie grossière de l'air, ne puisse forcer la pesanteur de la partie subtile, la raison de cette disproportion est, que la partie grossière de l'air ne s'élève que fort peu au-dessus de la terre, ainsi qu'il est aisé de conjecturer par la grande différence qu'on remarque dans les effets de cette pesanteur, en un fort petit espace, lorsque l'on porte un baromètre au haut d'une montagne : Car on remarque une notable différence dans la dépression du vif argent : Et il y a apparence que la raison pour laquelle on ne s'aperçoit point que le Ressort & la Dureté des corps varient, lorsqu'ils sont transportés en des lieux élevés, n'est autre que la grandeur de l'espace que la partie subtile de l'air occupe au-dessus de la partie grossière ; cet espace étant si grand, que la hauteur des lieux sur lesquels nous pouvons nous élever, n'est que comme rien, à proportion de la hauteur presque infinie que cette partie subtile a au-dessus de nous, & que l'on peut concevoir assez grande pour faire comprendre l'extrême difficulté qu'il y a à séparer les particules dont un diamant est composé.

L'air subtil, malgré sa pesanteur considérable, est composé de particules sphériques qui font qu'il est un fluide, et non pas un corps dur. Il est donc tout-à-fait pénétrable, tout comme l'eau n'empêche pas les poissons de bouger, et le mercure les corps de s'y enfoncer.

La théorie de la solidité des corps durs développée par Perrault, qui fait appel à un air subtil incompressible très étendu au-dessus de la terre, dont le poids considérable assure la cohésion de ces corps, conduit, tout comme l'explication de la suspension de l'eau, ou du mercure, par Huygens, et les expériences d'adhésion de marbres polis, à l'idée d'un air subtil présent en grande abondance, mélangé à l'air grossier. Wallis postule aussi l'action combinée d'un air grossier et d'un air subtil comme une hypothèse possible pour expliquer la suspension du mercure, mais la pression exercée par l'air subtil est dans son cas celle mesurée par le baromètre. L'explication proposée par Bernoulli du phosphore mercuriel, au tournant du XVIII^{ème} siècle, s'inscrit parfaitement dans ce contexte conceptuel, et renforce la plausibilité de l'existence de l'air subtil. Mais avant de décliner la pensée de Bernoulli sur les baromètres lumineux, nous allons examiner le système de l'impulsion qui est au cœur de la première hypothèse de Wallis précédemment évoquée relativement à la suspension du mercure.

4. Théories de la pesanteur et système de l'impulsion

Wallis, on l'a vu, émet l'hypothèse qu'en l'absence d'impulsion externe le mettant en situation d'être mis en mouvement par la pesanteur, le mercure pourrait rester suspendu dans le tube, tant qu'il n'a pas été choqué, ou qu'un peu d'air élastique n'a pas été introduit au-dessus du mercure. Il écrit à ce sujet :

Je sais, qu'on regarde la gravité ou la pesanteur comme une tendance de cette nature vers le centre de la terre, & par conséquent une tendance à se mouvoir ; ce qu'il y a donc d'étonnant, c'est qu'il n'en soit pas de même dans ce cas-ci ; mais si par hasard ce que nous appelons gravité, n'est pas une qualité positive, ou une tendance naturelle, mais l'effet de quelque impulsion ou percussion externe, surtout de la part de l'air atmosphérique, les corps pesants ne tomberont pas si cette pression trouve un obstacle, de quelque nature qu'il soit ; ce qui paraît être le cas dont il s'agit.

Cette explication est d'autant plus probable qu'on n'a pas encore trouvé la plus grande élévation, à laquelle le mercure peut rester suspendu de cette manière, & celle de 75 pouces est très considérable, eu égard à la pesanteur du mercure, puisqu'elle équivaut à 80 pieds d'eau.

Wallis préconise de rechercher expérimentalement un état dans lequel le mercure s'élève au-dessus du niveau d'équilibrage de la pression de l'air grossier (typiquement 28 pouces), mais avec un vide formé au-dessus du mercure, ce qui n'est pas le cas dans les expériences menées par Huygens, puis Boyle, lors desquelles le liquide reste « *suspendu* » au fond du tube quand on le retourne. Dans ce cas, en effet, la présence d'un vide où ne viendrait pas s'amasser la matière subtile, pressant dès lors la surface du mercure, invaliderait l'explication de Huygens. Du même coup, elle confirmerait celle émise par Wallis, le non déclenchement de la descente du mercure pouvant être attribué à l'absence d'un air élastique jouant le rôle d'activateur extérieur de la pesanteur.

Cette proposition de Wallis s'inscrit dans le débat très riche qui a lieu dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle sur les causes de la pesanteur. La conception cartésienne de la pesanteur fait appel à une matière subtile en rotation autour de l'axe de la terre, tournant plus vite qu'elle, et qui par conséquent a tendance à s'élever par rapport à elle du fait de la force centrifuge. L'impossibilité du vide exige que les lieux quittés par cette matière se remplissent des corps plus grossiers que cette matière rencontre sur son passage, ce qui implique que ces corps descendent vers la terre. Le postulat de base de la conception mécaniste de la pesanteur de Descartes, qui sera reprise notamment par Huygens, est exposé, par exemple, par Joseph Saurin (1709) :

Voici donc suivant cette idée, de quelle manière nous philosophons sur la pesanteur avec M. Huygens. Les corps pesants se meuvent vers le centre de la Terre ; ils y sont donc poussés. Les corps ne peuvent être poussés que par d'autres corps en mouvement qui les choquent ; il y a donc d'autres corps en mouvement, qui heurtent ceux que nous appelons pesants, & qui par ce choc les poussent où nous les voyons tendre. Ces autres corps ne sont point aperçus ; c'est donc une matière subtile, que la délicatesse de ses parties dérobe à notre vue ; & comme on sait d'ailleurs par mille autres effets, que la Terre nage dans un fluide d'une subtilité inconcevable ; qui l'environne de toutes parts ; il n'y a pas lieu de douter, que ce ne soit à cette matière fluide qu'il faut attribuer l'impulsion qui produit le mouvement des corps pesants.

Cette idée que l'attraction entre deux corps ne peut provenir que d'une poussée qui s'exerce sur eux de l'extérieur, est à la base de la plupart des théories de la pesanteur élaborées à cette époque. Les seuls milieux susceptibles d'exercer cette poussée à la surface de la terre sont l'air de l'atmosphère, et la matière subtile qui l'environne et baigne le tourbillon terrestre. Gassendi développe une théorie différente, inspirée du magnétisme, suivant laquelle des corpuscules

sortent de la Terre et viennent crocheter la matière des corps grossiers pour ensuite les ramener vers elle, mais celle-ci ne jouera pas de rôle structurant dans l'élaboration de la pensée en la matière, contrairement à l'approche cartésienne qui s'avère riche de prolongements. La publication par Newton, en 1687, de ses Principes, et de la loi de la gravitation universelle, ne conduira à l'abandon de la théorie des tourbillons et des explications mécanistes de la pesanteur qu'un demi-siècle plus tard. Elle n'a pas d'influence significative sur les théories de la pesanteur développées dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle et au début du XVIII^{ème} siècle.

Ainsi qu'on peut le lire à l'entrée GRAVITÉ de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751), Newton lui-même suggère que la gravité n'est pas une qualité essentielle aux corps, en invoquant l'existence d'un milieu raréfié, un éther extrêmement élastique, dont la densité augmente quand on s'éloigne du soleil en sorte qu'il pousse les corps « *depuis les parties les plus denses du milieu, jusqu'à l'extrémité de ses parties les plus raréfiées, avec toute cette force que nous appelons gravité* ». Mais ailleurs dans ses écrits, Newton note que « *l'impulsion d'un fluide est proportionnelle à la quantité de surface des corps qu'il frappe, au lieu que la gravité est comme la quantité de matière, & vient d'une cause qui pénètre pour ainsi dire les corps* », ce qui montre son peu d'adhésion à la théorie de l'éther comme source de la pesanteur. Il a sans doute été plus proche de ceux, comme Roger Cotes, qui pensaient que la gravité est une qualité première des corps au même titre que l'étendue, la mobilité, ou l'impénétrabilité.

Huygens pense, comme Descartes, que la pesanteur, « *étant un effort, ou une inclination au mouvement, doit vraisemblablement être produite par un mouvement* ». C'est une expérience d'hydrodynamique qui lui inspire sa théorie (publiée en 1690, mais remontant probablement à une vingtaine d'années auparavant), de nature cartésienne, mais opérant suivant des modalités différentes. Il remplit un vaisseau cylindrique d'une trentaine de centimètres de diamètre avec de l'eau et de la cire d'Espagne concassée. Il place une vitre au-dessus de la surface de l'eau et la scelle tout autour aux parois du vaisseau. Le vaisseau est placé sur une table tournante et mis en rotation, entraînant l'eau peu à peu. Les brins de cire, qui touchent le fond, suivent plus rapidement le mouvement du vaisseau et sont repoussés vers le bord extérieur. Puis le mouvement de rotation est interrompu brusquement, suite à quoi les brins de cire, qui touchent le fond et s'arrêtent presque aussitôt de tourner, contrairement à l'eau qui poursuit son mouvement par inertie, se rassemblent au centre du vaisseau. Pareillement, une boule roulant sur le fond rejoint le centre quand on interrompt le mouvement de rotation du vaisseau. Cette expérience fournit à Huygens un modèle de pesanteur, l'eau représentant la matière subtile en

rotation du tourbillon terrestre, et la cire la matière grossière descendant vers le centre du fait de la force centrifuge plus grande s'appliquant à l'eau, qu'elle entraîne vers l'extérieur, obligeant la matière grossière à migrer vers l'intérieur. Huygens critique sur deux points fondamentaux la théorie de Descartes, dans laquelle la matière subtile (i) ne pénètre pas, ou que peu, la matière grossière (car réfléchiée par la Terre suivant Descartes), et (ii) tourne autour de l'axe de rotation de la terre (et non autour de son centre) :

Que si l'on voulait que la matière céleste tournât du même côté que la Terre, mais avec beaucoup plus de vitesse, il s'en suivrait que ce mouvement rapide, d'une matière qui se mouvrait continuellement & toute d'un même côté, se ferait sentir, & qu'elle emporterait avec elle les corps qui sont sur la Terre, de même que l'eau emporte la cire d'Espagne dans notre expérience, ce qui pourtant ne se fait nullement. Mais outre cela, ce mouvement circulaire, autour de l'axe de la Terre, ne pourrait en tout cas chasser les corps, qui ne suivent pas le même mouvement, que vers ce même axe ; de sorte que nous ne verrions pas les corps pesants tomber perpendiculairement à l'horizon, mais par des lignes perpendiculaires à l'axe du monde, ce qui est encore contre l'expérience.

Il propose une explication plus en conformité, selon lui, avec l'observation :

[...] je supposerai que dans l'espace sphérique, qui comprend la Terre & les corps qui sont autour d'elle jusqu'à une grande étendue, il y a une matière fluide qui consiste en des parties très petites, & qui est diversement agitée en tous sens, avec beaucoup de rapidité. Laquelle matière ne pouvant sortir de cet espace, qui est entouré d'autres corps, je dis que son mouvement doit devenir en partie circulaire autour du centre ; non pas tellement pourtant qu'elle vienne à tourner toute d'un même sens, mais en sorte que la plupart de ses mouvements différents se fassent dans des surfaces sphériques à l'entour du centre du dit espace, qui pour cela devient aussi le centre de la Terre.

Ainsi, Huygens fait tourner la matière subtile autour du centre de la terre sur des surfaces sphériques, en supposant que cette matière « ne peut pas sortir de l'espace qui l'enferme » et qu'en conséquence elle « se meut plus aisément de cette manière que par des mouvements droits contraires les uns aux autres, lesquels même en se réfléchissant [...] sont réduits à se changer en circulaires ». Cette hypothèse de mouvement autour du centre de la Terre, et non de son axe de rotation, lui permet d'éviter la deuxième contradiction précédemment citée à propos de l'hypothèse de Descartes. Quant à la première, lui suppose que la matière subtile passe dans tous les interstices des particules composant les corps grossiers, les traversant donc aisément, bien qu'elle ne traverse pas ces particules elles-mêmes. Ainsi, la matière subtile monte à la place de ces particules, dont le volume est une mesure directe de la pesanteur qui s'exerce sur

ces corps : « *La pesanteur des corps suit précisément la proportion de la matière, qui les compose* ». Huygens calcule la vitesse de la matière subtile, de façon que la force centrifuge équilibre la pesanteur, et trouve qu'elle doit tourner 17 fois plus vite qu'un point à la surface de la Terre. Joseph Saurin (1709), qui défend la théorie de Descartes, reprend ce calcul et, à partir des résultats des expériences de Mariotte sur la force du choc des fluides, estime que la matière subtile, à cette vitesse, doit être trois ou quatre millions de fois plus ténue que l'air pour ne pas ébranler significativement les objets à la surface de la Terre. Il note qu'outre la densité, la taille des particules de matière subtile, comparée à celle des pores des corps traversés, est un facteur déterminant du problème. Concernant la contradiction de la théorie de Descartes avec le fait que les corps descendent vers le centre de la Terre, et non son axe de rotation, il montre (Saurin, 1703) qu'elle n'existe pas, en supposant le tourbillon sphérique et extérieurement pressé de toutes parts par la matière environnante « *suivant des lignes droites qui vont au centre* », invoquant une action de réaction de cette matière orientée vers le centre de la Terre. La théorie de Huygens, et dans une large mesure celle de Descartes dont elle est inspirée, d'après lesquelles c'est le mouvement de la matière subtile (traversant les pores du verre) qui est mécaniquement responsable de la pesanteur des corps, est incompatible avec l'hypothèse de Wallis d'une pesanteur non exprimée du mercure en l'absence d'une impulsion extérieure, puisque la matière subtile, étant au contact du mercure, lui confère la pesanteur et devrait l'amener à descendre.

Des critiques assez similaires à celles émanant de Huygens, et d'autres, sont faites à la théorie de Descartes par Jean-Baptiste de la Grange, un père Oratorien tenant de la philosophie scolastique, dans ses *Principes de la Philosophie contre les Nouveaux Philosophes*, en l'occurrence principalement Descartes et Gassendi, publiés en 1675. De la Grange y critique d'abord l'explication aristotélicienne du mouvement de la pierre lancée une fois qu'elle a quitté la main, à savoir que l'air vient remplir l'espace laissé libre dans le sillage de la pierre, et la pousse, car il lui paraît « *impossible que cet Air ait plus de force pour pousser la pierre en haut, qu'en a la pesanteur de la pierre pour la faire tomber* ». Au contraire :

C'est parce que l'Air empêche le Mouvement de ce que l'on jette, au lieu d'en être la cause & le principe, & que l'Air qui est devant, a plus de force pour empêcher le Mouvement de la flèche, que celui de derrière n'en peut avoir, pour la faire avancer. Enfin, c'est la résistance de l'Air, qui diminue petit à petit le Mouvement des Corps que l'on jette, & qui les oblige à la fin du temps de tomber ; nous n'avons pas d'autre raison de cette expérience : C'est pourquoi il est impossible de soutenir que l'Air soit la cause de leur Mouvement.

Sa position est que « *quand on jette un Corps en l'Air, on produit en lui une Qualité, un Être & un Poids, qui l'oblige après de se mouvoir, & de se porter soi-même, comme la pesanteur des Corps les fait tomber d'eux même, & les oblige de quitter ce qui cesse de les soutenir* ». Pour lui, le mouvement, comme la pesanteur, ne sont pas des qualités inhérentes à la pierre, mais elles lui sont communiquées, par la main dans le cas du mouvement, par la terre dans celui de la pesanteur. De la Grange dit avoir pensé dans un premier temps que « *que le Mouvement pouvait détruire la pesanteur, & que la Terre & l'Air agissant perpétuellement sur les Corps qui étaient dans le Mouvement, en diminuaient premièrement le Mouvement par leur action contraire ; & qu'ensuite ils y produisaient une pesanteur égale à la première : comme le feu diminue la froideur de l'eau, & y produit ensuite la chaleur* ». Autrement dit, une pierre lancée en l'air n'est pas pesante, et ne le devient qu'au moment où elle s'immobilise au sommet de sa trajectoire, avant de retomber sous l'effet de la pesanteur. Mais, à la réflexion, « *il ne se peut pas faire aussi que la Terre & l'Air produisent dans une balle de plomb la même pesanteur qu'elle avait auparavant, dans l'instant qu'elle cesse de monter* », et il faut croire que « *le Mouvement ne détruit point la pesanteur, ni la pesanteur le Mouvement ; mais que ces deux Qualités compatissent ensemble dans le même sujet* ».

Concernant la pesanteur, puisque « *nous voyons que les Qualités d'une Pierre ne peuvent pas obliger la Pesanteur d'une autre pierre à la pousser vers elle, quoiqu'elles soient bien plus conformes que ne sont les Qualités de la Terre avec celles de tous les Corps pesants* », c'est-à-dire qu'on ne voit pas deux pierres se porter l'une vers l'autre malgré des qualités identiques, alors que la pierre descend vers la terre, il faut que la vertu de pesanteur soit communiquée à tous les corps pesants par un même corps, qui peut être, d'après de la Grange, l'air ou la Terre. L'air étant d'autant plus pesant qu'il est proche de la Terre, c'est celle-ci qui doit contenir la Vertu Attractive : « *il faut nécessairement dire qu'il y a dans le Centre de la Terre, ou dans la Terre même, une Vertu particulière, laquelle se communique aux Corps pesants par le moyen de l'Air, & les détermine à peser plutôt vers la Terre, que vers le Ciel* ». Cette vertu doit se trouver dans toutes les parties de la Terre. La qualité de pesanteur est probablement une qualité première, et non pas le mélange de plusieurs qualités, la pesanteur se faisant sentir partout de manière identique. L'air des plaines étant plus pesant que celui des montagnes, c'est la Terre qui communique la pesanteur à l'air, et à ses météores, qui ont les dispositions nécessaires pour le recevoir. Revenant sur la question de la balle lancée vers le haut, De la Grange explique que la première raison qui l'oblige de considérer que la balle est déjà pesante quand elle monte est « *le peu d'apparence qu'il y a que l'Air puisse produire dans un instant dans la Balle ou dans*

la Pierre qui commence de tomber, la même Pesanteur qu'elle avait devant son Mouvement ». Autrement dit, l'air communique dès le départ à la balle, avant même qu'on la lance, la pesanteur qui lui est transmise par la Terre. Pour De la Grange :

[...] la Pesanteur est une Vertu Sympathétique qui pousse le sujet dans lequel elle se trouve, vers le Corps qui possède la même Qualité ; pourvu néanmoins qu'il y ait communication de l'un à l'autre : Car si, par exemple, il y avait dans les Espaces imaginaires deux Corps pesants, qui fussent éloignés l'un de l'autre, la Pesanteur de celui qui serait à droite ne le pousserait point vers celui qui serait à gauche : Parce que n'y ayant point de communication entre eux, ils seraient comme s'ils étaient seuls.

Il n'est donc nullement question d'une poussée physique exercée par l'air, qui rendrait le corps pesant. Si la balle ne communiquait pas avec la Terre par l'air qui les sépare, celui-ci transmettant la « *vertu sympathétique* » de la pesanteur, elle ne posséderait pas la vertu attractive et ne descendrait pas d'elle-même vers la Terre. C'est-à-dire précisément l'hypothèse proposée à vérification expérimentale par John Wallis.

Une troisième explication est l'effet de la pression de l'air. C'est, comme on peut le lire à l'entrée ACCÉLÉRATION de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751), l'une des causes à laquelle certains attribuent l'accélération des corps qui descendent vers la Terre : « *plus, disent-ils, un corps descend, plus le poids de l'atmosphère qui pèse dessus est considérable* ». Si l'on ajoute à cela la convergence des lignes verticales vers le centre de la Terre, l'effet de la pression est d'autant plus fort qu'un corps est proche de la surface de la Terre. À l'objection suivant laquelle, plus un corps descend, plus il rencontre de résistance de la part de l'air environnant, les partisans de l'effet de la pression répondent que « *l'air à mesure qu'il est plus proche de la terre, est plus grossier & plus rempli de vapeurs & de particules hétérogènes qui ne sont point un véritable air élastique* » et que l'élasticité de l'air du dessous augmente moins, à proportion, que le poids de l'air du dessus au cours de la descente d'un corps.

Un argument fort contre cette conception est le résultat des expériences de chute de corps réalisés dans des machines du vide. Dès 1669, Boyle démontre expérimentalement qu'une plume, qui virevolte dans l'air en tombant, tombe directement quand on fait le vide, et cela de manière reproductible. Bien que le temps de chute soit court, et l'enceinte à vide pas suffisamment haute selon Boyle pour permettre une mesure précise, les observateurs constatent que la plume semble tomber plus vite dans le vide que dans l'air. En 1705, Hauksbee lâche de

la poudre de malt dans une enceinte préalablement pompée, et constate qu'au lieu d'onduler et de flotter durant une « *temps considérable* », elle tombe en droite ligne comme un corps pesant. L'année précédente, Derham avait publié dans les *Philosophical Transactions* un article pour décrire ses expériences de pendules dans le vide, entamées avec l'aide d'Hauksbee, montrant que l'oscillation d'un pendule est plus ample dans le vide que dans l'air, et qu'elle est susceptible de faire varier l'horloge de plusieurs secondes par heure. Au tout début du XVIII^{ème} siècle, c'est un fait avéré par l'expérience, et précisément mesuré, que tous les corps descendent à la même vitesse dans le vide, ce qui valide l'inférence (bien antérieure) de Galilée, basée sur des expériences de descente de corps dans l'air, suivant laquelle « *la résistance des milieux dans lesquels les corps tombent, était la seule cause des différences qui se trouvent dans le temps de leur chute vers la terre, & que dans un milieu qui ne résisterait point du tout, tous les corps de quelque nature qu'ils fussent tomberaient également vite* » (cf entrée PESANTEUR de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert).

Dès 1684, Edmond Halley passe en revue dans son discours sur la gravité, publié dans les *Philosophical Transactions*, les hypothèses existantes sur la nature de la gravité. Concernant la théorie de Descartes, Halley dit ne pas la comprendre :

Je dois avouer que la Doctrine de Descartes selon laquelle les Particules de la matière Céleste, s'élevant depuis la Surface de la Terre qui les réfléchit, font descendre à leur place les Corps Terrestres qu'elles trouvent au-dessus d'eux, m'est incompréhensible, [...] ni lui, ni aucun de ses disciples ne sait montrer comment un Corps, suspendu librement dans l'éther, peut être poussé vers le bas par une Impulsion tendant continuellement vers le haut, et agissant sur toutes ses parties également : Sans parler de l'obscurité avec laquelle il s'exprime.

Il mentionne ensuite les partisans de l'effet de la pression atmosphérique, pour aussitôt montrer que leur position est intenable pour des raisons fondamentales, en citant également les expériences de descente de corps dans le vide :

[...] Malheureusement, ils se sont trompés sur la cause de l'Effet, car des Principes incontestables montrent clairement que l'Atmosphère ne subit pas d'autre Pression que celle qui découle de sa Gravité, et que le Poids des parties supérieures de l'Air, en appuyant sur les parties inférieures, fait plier les Ressorts de ce Corps Élastique, au point de lui donner une force égale au Poids qui l'a Comprimé, n'ayant de lui-même aucune force ; Et supposant que cela soit le cas, il est très difficile d'expliquer la Raison pour laquelle cette pression devrait provoquer la descente d'un corps circonscrit par elle, pressé également au-dessus et en dessous, sans autre force pour l'attirer ou le pousser vers

le bas. Mais, démontrant la fausseté de cette opinion, une expérience a été faite depuis longtemps devant la Royal Society, par laquelle il est apparu que l'atmosphère ne pouvait être la cause de la gravité, car les effets de celle-ci se montraient beaucoup plus vigoureux là où la pression de l'atmosphère était supprimée ; ainsi, ayant vidé de son air un long récepteur de verre dans lequel on avait placé une plume, la plume qui auparavant, dans l'air, ne chutait qu'avec difficulté, descendait dans le vide avec presque la même vitesse que si elle était une pierre.

Le jugement de Halley, scientifiquement exact, et énoncé avec autant de clarté, aurait dû suffire à définitivement faire écarter par ses successeurs l'explication de la pesanteur par la pression de l'air. Il peut sembler surprenant que, six ans après la publication de l'article de Halley, Pierre Varignon ait néanmoins publié une théorie de l'accélération par la pression pour le moins hasardeuse, semblant même ignorer les résultats de Boyle et Mariotte obtenus vingt ans plus tôt sur la loi de dilatation des gaz. Varignon, qui est avant tout un mathématicien au fait du calcul infinitésimal, se base sur le curieux constat de Mersenne, à savoir que des boulets de canon tirés verticalement n'ont jamais été retrouvés, et sont donc supposés être restés en suspension dans l'atmosphère. L'idée physique de Varignon est qu'un cube de bois (par exemple) placé à une hauteur faible au-dessus du sol (par exemple un pied), reçoit une impression par choc beaucoup plus grande de la colonne d'air qui se trouve au-dessus de lui, que de celle qui se trouve au-dessous, qui est beaucoup moins haute. C'est de l'inégalité de la colonne du dessus et de celle du dessous que naît le mouvement vertical. Tout en haut de l'atmosphère, la colonne du dessous l'emporte, et le corps doit monter. Il existe, vers le milieu de l'atmosphère, où les poussées des colonnes supérieure et inférieure s'équilibrent, un « *espace de repos des corps pesants* », où doivent notamment se trouver les boulets de canon qui ne sont pas retombés. Pour Varignon, toutes les particules de la colonne, même situées à des dizaines de kilomètres au-dessus du cube, voire des millions si on l'étend à toute la hauteur du tourbillon terrestre, jouent pareillement pour presser le cube. Varignon fait, pour le justifier, un parallèle avec la lumière, qu'on peut voir à très grande distance, en assimilant l'onde de pression à une onde lumineuse, et en supposant donc une transmission instantanée de la poussée exercée par les chocs des particules à travers toute la colonne. De plus, il relie la pression à la hauteur de la colonne, sans tenir compte de la dilatation de l'air avec l'altitude. Il montre que l'existence de trous (porosité) dans un corps réduit la force exercée par les colonnes d'air, le rendant moins pesant. Il considère, en plus de l'air, la matière subtile qui l'entourne (l'éther), qui est pesante, et dont l'effet doit être pris en compte :

D'où il suit, que la liquidité de la matière subtile est une cause bien plus générale de la pesanteur des corps, que n'est la liquidité du gros air ; puisque ce gros air n'est lui-même pesant, que par la liquidité de cette matière, c'est-à-dire, du plus délié; & que c'est par la liquidité de ces deux airs ensemble, que pèsent tout ce qu'il y a de corps pesants sur la Terre, & sur les autres Planètes.

Mais aussi en récompense, cet air grossier doit par son poids presser encore de haut en bas tout ce que sa liquidité, jointe à celle de la matière subtile, a fait de corps pesants : Et par là en augmenter ou en diminuer la pesanteur selon qu'il les charge seulement de son poids, ou qu'à même temps il les contrebalance.

Varignon critique la théorie de Descartes, ainsi semble-t-il, bien qu'il ne le nomme pas, Huygens pour son idée selon laquelle les particules de la matière subtile « *tournent en rond dans un nombre innombrable de directions toutes concentriques à la terre* », car pourquoi précisément autour du centre de la Terre, et suivant des lignes circulaires, plutôt que d'une autre forme ? D'autre part, il dit que la descente des corps devrait se faire suivant des tangentes aux cercles décrits par la matière subtile, car un corps qui s'échappe d'une fronde part, quand il est lâché, suivant la tangente à sa trajectoire circulaire. Il mentionne que cette question a été abordée par Jacques Bernoulli dans son mémoire sur la pesanteur de 1683, qui semble également invoquer l'effet combiné des pressions exercées par l'air grossier et par la matière subtile. On trouve dans une note de lecture parue dans le Journal des Savants (1685) à propos du mémoire de Bernoulli, des preuves avancées par celui-ci en faveur de l'éther pesant, à savoir l'adhérence des marbres polis, bien supérieure à celle générée par la seule pression de l'air grossier, évoquée précédemment, et également le fait que l'hiver, l'air étant plus pesant et plus épais, le mercure devrait monter plus haut dans le baromètre, ce qui n'est pas observé, ce qu'il attribue à la matière subtile traversant le verre et pesant sur la surface du mercure dans le tube. Dans une lettre datée de 1686, Bernoulli fait la réflexion que « *quoique l'air & la matière subtile du lieu que nous habitons, soit dans un effort continuel pour suivre une telle tangente, il se peut bien faire qu'effectivement son action ne se communique pas suivant cette tangente horizontale ; mais suivant une perpendiculaire, tirée du centre de la Terre à notre Zénith* », ce qui revient à représenter, de façon correcte, l'action par la force centrifuge.

Au tournant du XVIII^{ème} siècle, Samuel Clarke, un théologien britannique ami de Newton, débat à travers une série de plusieurs lettres et réponses, avec Henry Dodwell, un autre théologien, à propos de l'immortalité de l'âme. Cette correspondance, qui s'étale sur cinq ans entre 1706 et 1711, est publiée dans son intégralité en 1731. La question de la gravitation, et de l'impulsion extérieure, est abordée dans ces pages. Pour Clarke, comme on peut le lire à l'entrée GRAVITÉ

de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert, « *ce n'est point effet accidentel de quelque mouvement ou matière subtile, mais une force générale que le Tout-puissant a imprimée dès le commencement à la matière, & qu'il y conserve par quelque cause efficiente qui en pénètre la substance* ». Dodwell s'élève contre cette opinion :

[...] la figure externe et la configuration interne des parties de la matière sont ces pouvoirs dans la matière par lesquels elle reçoit des Corps environnants exerçant leur action ce mode particulier de mouvement qu'on appelle gravitation. Qu'on laisse tomber une livre de plomb, sous la forme d'une balle, du sommet d'une tour, et elle descend rapidement jusqu'au sol : qu'on modifie la figure extérieure de la balle, en la frappant avec un marteau, et sa tendance à descendre diminue ; qu'on change la configuration de ses parties par le feu, et elle montera au lieu de descendre ; la même action des corps environnants produisant ces trois effets différents par cette triple disposition de la même quantité de plomb : de sorte que la détermination de la matière semble tenir purement aux causes et aux pouvoirs que j'ai attribués.

Ainsi, Dodwell attribue aux différentes configurations externes de sa masse de plomb des différences dans la gravitation qui la fait descendre. Clarke répond ainsi :

Il a été démontré, même mathématiquement, que la gravitation ne peut pas résulter de la configuration et de la texture des parties de la matière, ni des corps environnant exerçant leur actions, car si c'était le cas, elle ne serait pas proportionnelle à la quantité de matière ou au contenu solide de tous les corps, sans considération de leur forme superficielle ; comme nous le montre l'expérience, tous les corps, de toutes textures, toutes configurations de leurs parties, toutes variétés de leur forme superficielle [une balle, une plume, un morceau de feuille d'or, une feuille de papier] descendent dans le vide à la même vitesse. Et si l'impulsion matérielle n'est pas la cause de la gravité, alors un être qui n'est pas matériel (car les lois ou les pouvoirs ne sont que des mots vides) doit nécessairement en être la cause.

Il argumente tout d'abord sur le fait que la théorie de l'impulsion extérieure impliquerait que l'attraction gravitationnelle soit reliée plutôt à la surface du corps plutôt qu'à la quantité de matière qu'il contient, argument dont nous avons vu qu'il fait douter Newton de l'existence d'un éther responsable de la gravité. Ensuite, il mentionne les expériences de descente de corps dans des enceintes à vide menées à la fin du XVII^{ème} siècle, qui montrent des vitesses de chute égales, quelle que soit la masse et la forme de ces corps. Il pointe le rôle de la résistance de l'air, responsable de la variabilité mentionnée par Dodwell, qu'il dissocie clairement de la gravitation :

Une livre de plomb sous la forme d'une balle a-t-elle une plus grande tendance à descendre que sous toute autre forme, parce que l'air lui opposant une moindre résistance quand elle a cette forme impose qu'elle tombe plus rapidement ? Ou lorsqu'elle est sous la forme d'une fine plaque, qui pèse encore une livre, sa tendance à descendre diminue-t-elle, parce que l'air, lui opposant une plus grande résistance du fait de sa plus grande surface, lui impose maintenant de tomber lentement ?

Dans sa réponse, Dodwell dit qu'il est loin d'être évident que, dans les expériences de descente de corps dans le vide, toute la matière a bien été extraite de l'enceinte. Il en fait un argument général contre Clarke, à savoir que tant que l'existence de parties de l'espace vide de toute matière n'est pas démontrée, on ne peut nier le rôle de l'impulsion extérieure :

Mais quoi qu'il en soit, à moins que M. Clarke ne prouve qu'il existe un véritable vide dans la nature, c'est-à-dire qu'il y a des parties de l'espace vides de tout corps ; et à moins qu'il ne prouve qu'on peut créer dans un vaisseau une portion d'espace sans la moindre particule de matière, de sorte qu'il puisse essayer de déterminer si les corps pèsent ou descendent sans le moindre contact avec d'autres corps ; il ne sera pas en mesure de prouver que l'impulsion matérielle n'est pas la cause de la gravitation : et j'en profite pour dire ce que je pense, à savoir que pour un corps au départ situé en sorte de n'être entouré que d'espace pur, il n'y aurait pas de début de mouvement, pas de poids, pas de gravitation dans ce corps.

La dernière phrase de l'extrait ci-dessus exprime précisément ce qui fait la base de l'hypothèse de Wallis. A cette objection, Clarke répond, dans une autre lettre, que son argument à propos de l'égalité de vitesse de descente des corps dans le vide, ne constitue pas le cœur de sa conception, n'en étant qu'un corollaire. Il réaffirme, en bon newtonien, son argument fondamental, à savoir que « *la gravité est exactement proportionnelle à la quantité de matière solide contenue dans les corps, et pas du tout à la quantité de leur surface* ».

On trouve, dans le Journal des Savants de 1753, un commentaire sur un livre de Jean-Claude Helvétius, un médecin également physicien, qui aborde la question de la gravité. Pour Helvétius, comme pour Dodwell cinquante ans auparavant, la machine du vide n'est pas entièrement dépourvue de fluides capables d'exercer une pression. À l'affirmation des newtoniens selon laquelle « *deux corps mis dans le vide tendent l'un vers l'autre, quoiqu'il n'y ait point d'air pour les pousser* », il objecte que les hémisphères de Magdebourg, réunis dans l'air du fait du vide fait entre eux, se désunissent quand on les place dans le vide, ce qui montre

selon lui l'absence d'attraction gravitationnelle dans le vide. Il juge que la force d'attraction n'est pas inhérente aux corps entre lesquels elle s'exerce, et le justifie en notant que les phénomènes de l'aimant et de l'électricité peuvent s'expliquer facilement par l'impulsion en faisant appel aux exhalaisons émanant de ces corps. Il attribue la suspension des liqueurs dans les tuyaux capillaires à la « *cohérence des particules de ces liqueurs avec les parois du verre* », qui, aidée par la « *force impulsive des fluides subtils qui s'élèvent continuellement de la Terre* », les maintient en équilibre. Il tire prétexte des expériences de suspension du mercure très au-dessus de 28 pouces menées Boyle, et Huygens, pour affirmer que la suspension du mercure dans le baromètre n'est pas causée par la gravité de l'air, mais par la force impulsive de la matière subtile, renforcée par l'air grossier qui « *empêche les particules subtiles de se disperser de toute part, & les oblige de se porter principalement vers l'orifice du tuyau & d'y élever la liqueur* ». Cette suspension est aidée par la cohérence des parties du fluide entre elles et avec la paroi du verre, de sorte que si de l'air s'insinue à travers la colonne de mercure, le baromètre descend, non pas, peut-on comprendre, parce qu'il exerce une pression sur la surface du mercure dans le tube, mais parce qu'il désolidarise les particules du mercure de la paroi, ainsi que des autres particules. Ce texte montre à quel point le « *système de l'impulsion* », et la croyance dans le rôle de l'air, et de la matière subtile, comme cause du déclenchement du mouvement imprimé par la gravité, reste encore très présent au milieu du XVIII^{ème} siècle. Et ceci en dépit de l'évidence des lois de l'attraction universelle énoncées par Newton, ainsi que des expériences de descente de corps dans le vide réalisées par Boyle, remontant au siècle précédent.

L'expérience proposée en 1672 par John Wallis pour tester la véracité du système de l'impulsion, à savoir la suspension du mercure bien au-dessus de 28 pouces, mais sous un espace vide présent au-dessus du mercure dans le tube, ne sera bien entendue jamais réalisée. Comme nous l'avons montré, cette expérience ne prenait sens que dans l'hypothèse d'une action directe de l'air, soit en tant que transmetteur de la « *qualité sympathétique* » de pesanteur entre la Terre et un corps, ainsi que le conçoit De la Grange, soit en tant que fluide d'un air grossier pesant physiquement sur les corps, au sens par exemple où l'entend Varignon. Le modèle d'inspiration cartésienne développé par Huygens, qui fait intervenir la matière subtile comme source directe d'impulsion sur les corps grossiers, cette matière traversant les pores du verre, invalide le principe même de la vérification expérimentale proposé par Wallis. On doit relever à quel point le milieu scientifique français, imprégné de doctrine cartésienne, résiste longtemps à la révolution newtonienne, alors même que la loi de l'attraction universelle

explique les lois de Kepler, au contraire de la théorie des tourbillons, et que l'explication de la gravité par la pression de l'air est mise en défaut par les expériences de Boyle dès 1669, donc avant même l'article de Wallis, et l'absurdité physique de cette explication clairement exposée par Halley quinze ans plus tard.

5. Baromètres lumineux

C'est à Jean-Félix Picard qu'on doit la première observation de la lumière barométrique, phénomène encore appelé « *phosphore mercuriel* ». On trouve une relation de cette découverte dans le Journal des Savants de 1675. Manipulant un baromètre, Picard découvre que « *lorsqu'on le remue assez pour faire balancer le vif-argent, [il] fait comme des éclairs et jette une certaine lumière entrecoupée qui remplit toute la partie du Tuyau ou se fait le vide : mais cela n'arrive à chaque balancement que lorsque le vide se fait, & dans la seule descente du vif-argent* ». La même expérience réalisée sur d'autres baromètres n'est couronnée de succès que dans un seul cas. Dufay (1723) raconte que Jean Bernoulli, lisant le « *petit traité des baromètres & notiomètres ou hygromètres* » publié en 1688, décide de s'intéresser à ce phénomène. Dans une lettre datée de novembre 1700 à Pierre Varignon, il expose son idée de « *faire du mercure un Phosphore portatif & perpétuel, que je puis transporter & envoyer commodément & sans danger partout où je voudrai & en tout temps ; car il durera éternellement sans que sa lumière, à la force de laquelle celle du baromètre n'est pas à comparer, ne diminue jamais* ». Les expériences qu'il a préconisées, faites par les membres de l'Académie des Sciences, n'ont cependant pas eu le succès escompté, les baromètres préparés suivant ses consignes n'ayant pas donné de lumière, et un baromètre rempli sans précaution particulière ayant par contre été lumineux. Bernoulli explique ces échecs par le fait que, si le mercure n'est pas suffisamment propre, il se forme à sa surface une pellicule qui inhibe la production de la lumière.

La raison pour laquelle la présence d'une pellicule recouvrant le mercure empêche la production de lumière tient à l'explication théorique que donne Bernoulli du phénomène. Bernoulli résume ainsi sa théorie (1707) :

Comme la lumière ne paraît dans chaque balancement, que lorsque le vide se fait, c'est-à-dire dans la seule descente du vif argent, j'ai compris que quand le vif argent descend, il en doit sortir & remonter au même instant une matière très déliée & très subtile pour occuper & remplir en partie l'espace du tuyau que le vif argent quitte : je dis en partie parce qu'il faut bien croire, que les pores

du verre étant sans doute plus amples que ceux du vif argent (comme il paraît par la légèreté de l'un & la grande pesanteur de l'autre,) il entre en même temps par les pores du tuyau une autre matière bien plus subtile que l'air grossier, mais bien moins que celle qui sort du vif argent & ces deux matières se mêlant incontinent, remplirent l'espace que le vif argent leur cède par sa descente.

Cette idée est inspirée de celle de Descartes (*Principes*, quatrième partie, article 58, 1644) concernant la formation du vif-argent (le mercure), une liqueur dense que seules la matière du premier élément, et éventuellement les plus petites parties de la matière du second élément, à l'exclusion donc de l'air grossier que nous respirons, peuvent pénétrer et agiter :

Et même il y a eu peut-être quelque endroit au dedans, ou bien au-dessous de ce corps C [la Terre intérieure], où il s'est assemblé plusieurs de ces parties qui ont des figures si unies & si glissantes, qu'encore que leur Pesanteur soit cause qu'elles s'appuient l'une sur l'autre, en sorte que la matière du second Élément ne coule pas librement de tous côtés autour d'elles, ainsi qu'elle fait autour de celles de l'eau, elles ne sont toutefois aucunement attachées l'une à l'autre, mais sont continuellement mues, tant par la matière du premier Élément qui remplit tous les intervalles qu'elles laissent autour d'elles, que par les plus petites du Second, qui peuvent aussi passer par quelques-uns de ces intervalles, au moyen de quoi elles composent une liqueur, qui étant beaucoup plus pesante que l'eau, & n'étant aucunement transparente comme elle, a la forme de l'argent vif.

Bernoulli adopte la théorie de Descartes de la production de la lumière (*Principes*, quatrième partie, article 90) :

Car il n'est besoin d'autre chose pour produire de la Lumière, sinon que les parties du second Élément soient poussées par la matière du Premier [...]. Et lorsque quelque corps Terrestre a plusieurs pores qui sont si étroits qu'ils ne peuvent donner passage qu'à cette matière du premier Élément, il peut arriver que bien qu'elle n'y ait pas assez de force pour détacher les Parties de ce corps les unes des autres, & par ce moyen le brûler, elle en ait néanmoins assez pour pousser les parties du second élément qui sont en l'air d'alentour, & ainsi causer quelque lumière.

La raison de l'échec de la production de lumière dans la plupart des baromètres provient d'après lui de la formation d'une pellicule à la surface du mercure : « *toute humidité & toute matière hétérogène, peut ou boucher les pores du vif argent pour empêcher l'élancement de la matière du premier élément, comme fait la pellicule ; ou du moins arrêter en partie la grande rapidité avec laquelle le premier élément doit être mu pour exciter de la lumière* ». On doit donc éviter tout contact entre le mercure introduit dans le tube et l'air ambiant. Il faut également que le vide du baromètre soit le plus parfait possible pour que « *le choc de matière du premier Élément et*

contre celle du second, traversant les pores du verre, ne soit pas affaibli par le mélange de l'air, qui étant en comparaison d'elles fort grossier, & fort lent, aurait fait l'effet d'un sac de laine qui reçoit un coup de canon ». Les conditions posées par Bernoulli à la réussite de l'expérience sont au nombre de trois : « 1°. *Que le Mercure fût extrêmement pur.* 2°. *Que le Baromètre fût construit de manière que le Mercure y entrât sans traverser l'air.* 3°. *Que le vide du haut du tuyau fût aussi parfait qu'il le pût être* ». Bien que ces conditions aient été, semble-t-il, respectées par les expérimentateurs de l'Académie, leurs expériences ne reproduisent qu'imparfaitement celles menées par Bernoulli. Un artefact lié à la présence dans le mercure d'un phosphore favorisé par le lavage préalable du mercure à la chaux vive est soupçonné par l'Académie.

Bernoulli, dans sa lettre de novembre 1700, répond à ces critiques et insiste sur le protocole de préparation, d'après lui insuffisamment rigoureux lors des expériences faites par l'Académie. Il préconise de se concentrer sur l'expérience de la fiole chargée en mercure et secouée à la main, plutôt que sur celle du baromètre. Utilisant une fiole équipée d'un robinet, dans laquelle il a introduit du mercure bien purgé d'air et nettoyé, dont l'air est ensuite pompé, il agite la fiole dans l'obscurité, et « *voilà que tout aussitôt la fiole parut pleine d'un feu dont la lumière n'était ni interrompue ni entrecoupée comme celle du Baromètre, mais qui durait tant que le mercure était en agitation* ». Il constate un affaiblissement de la lumière, qui va en s'accroissant avec le temps, quand il introduit un peu d'air dans la fiole. L'examen du dispositif à la lumière du jour montre la formation, à la surface du mercure, d'une pellicule « *non seulement visible, mais si épaisse qu'elle ressemblait à une pâte pétrie de poussière de terre* ». Pour améliorer la qualité du vide, Bernoulli met au point un système ingénieux. Il ferme la fiole « *avec un bouchon de liège, & avec de la cire propre pour cela par-dessus* ». Puis il fait « *un petit trou avec une épingle au travers de la cire & du liège* ». Il enferme la fiole dans un récipient d'où il tire l'air. Puis, exposant « *le récipient ainsi vidé au soleil, & par le moyen d'un verre convexe* », il fait « *un peu fondre l'extrémité de la cire autour du trou : de cette manière le trou se remplit de cire fondue, & se bouche parfaitement bien soi-même* ». Après quoi, il pompe de nouveau le récipient puis il sort la fiole ainsi hermétiquement scellé du récipient. Le résultat est selon lui spectaculaire :

Je garde depuis 5 à 6 semaines, deux de ces fioles remplies de deux diverses sortes de vif-argent, lesquelles font admirablement bien leur effet. Les curieux auxquels je les ai montrées, ont avoué qu'ils

n'ont rien vu de plus rare ; effectivement toute la capacité de la fiole est en flamme, & le mercure ressemble à une liqueur ardente.

Il énonce ensuite les conditions pour la préparation, à savoir que la fiole soit parfaitement propre et sèche à l'intérieur, que le mercure ne soit pas trop remué avant la pompage de la fiole, et que le vide soit fait le plus soigneusement possible.

Une deuxième lettre, daté de juillet 1701, répond à un compte-rendu à nouveau défavorable de l'Académie des Sciences, qui stipule que « *c'est quelque accident particulier arrivé à quelque mercure qui le peut rendre capable de luire en un lieu vide d'air* ». Bernoulli met à nouveau en cause le protocole de préparation de la fiole, invoquant un degré de purification du mercure insuffisant, et la présence probable d'humidité dans la fiole. Il préconise une technique de nettoyage du mercure par mélange avec de l'eau, ou de l'esprit de vin, et agitation du mélange, ceci à plusieurs reprises, jusqu'à ce que l'eau apparaisse parfaitement claire après agitation, puis filtrage à travers un linge sec. Il traite ainsi un mercure qui ne donne pas de lumière, et montre qu'après lavage, il devient lumineux, et ceci même dans une fiole pleine d'air, la lumière consistant dans ce cas en un grand nombre d'étincelles séparées, au lieu d'une « *flamme continue* », comme on l'observe dans le vide. Il dit ne pas croire à la présence de « *parcelles ignées* » provenant de la chaux qui causeraient la lumière, et l'attribue plutôt à la distillation qu'il fait subir au mercure qui, « *s'il est parfaitement purifié, peut laisser sortir de ses pores la matière subtile [...] en tant d'abondance à la fois, que malgré la résistance de l'air elle a encore assez de mouvement pour produire quelque lumière* ». Fontenelle conclut ainsi son article de 1704 à ce sujet :

Le Mercure n'a aucun autre don pour la production de la lumière que la petitesse de ses pores, où la matière subtile peut seule être admise. Toute autre liqueur dont la pesanteur serrerait autant les parties, & rendrait les pores aussi petits, serait aussi propre à être Phosphore. Mais comme nous n'en avons aucune qui soit aussi pesante, le Mercure demeurera apparemment le seul Phosphore de son espèce, & en même temps il sera le premier de tous, si selon les espérances de M. Bernoulli, & même selon plusieurs apparences physiques, il est inaltérable, & perpétuel; ce sera un Phosphore semblable en quelque sorte aux Phosphores célestes.

Dufay (1723) relate que l'Académie finit par confirmer, en 1706, les résultats de Bernoulli, reconnaissant le manque d'exactitude des expériences menées dans un premier temps.

De l'autre côté de la Manche, Francis Hauksbee publie en 1705 la relation de plusieurs expériences faites avec du mercure pour produire de la lumière. Dans l'une d'entre elles, il précipite dans une enceinte préalablement vidée de son air, puis mise au contact de l'air extérieur, un flux d'air à travers un tube rempli de mercure. Il constate que le mercure, soufflé contre les parois du tube, forme un « *corps de feu* » composé d'un grand nombre de globules brillants. Dans une autre expérience, il utilise une enceinte de verre cylindrique, préalablement vidée de son air, au centre de laquelle il place un tube de verre fermé à son sommet. En utilisant un entonnoir, il injecte du mercure par un trou situé au sommet de l'enceinte, le mercure étant projeté en tombant, sous la pression de l'air extérieur, contre l'obstacle constitué par le tube central. Il observe que le mercure y est brisé en de nombreuses petites particules qui descendent en une « *pluie de feu* » entre les parois du tube central et de l'enceinte. Hauksbee écrit :

Mes observations m'ont fait comprendre que la descente du mercure ressemblait plus à la chute de la neige, par la fluidité de son mouvement, qu'à celle de la pluie. Que rien de tout cela ne semblait lumineux, à part ce qui descendait en étant contigu aux parois du verre [...] Que les plus petits globules, dont le poids n'était pas suffisant pour provoquer leur descente, restaient opaques, la lumière (dans cette expérience comme dans toutes les autres expériences sur le mercure) ne pouvant être obtenue sans le mouvement [...] De tout cela il semble apparaître très clairement qu'il faut, pour produire le phosphore mercuriel, la conjonction d'une figure appropriée, d'un milieu et d'un mouvement.

Il associe clairement la production de lumière au mouvement des particules, et au contact entre ces particules et les parois de verre. Dans une troisième expérience, il utilise un baromètre, et fait osciller le mercure, ainsi que dans l'expérience initiale de Picard. Il injecte au-dessus du mercure des bouffées d'air successives, et constate que le phénomène lumineux cesse totalement quand la moitié de l'air initialement pompé a été réinjecté. Il conclut que la production de lumière ne peut se faire dans l'air ambiant, mais qu'il n'est pas nécessaire d'obtenir un grand degré de vide pour qu'elle ait lieu. Dans une autre expérience, il réalise le vide au-dessus du mercure et secoue le tube avec impétuosité. Il remarque de la lumière est d'autant plus vive que le mercure est secoué fortement. Quand l'agitation est très rapide, il se forme des vagues de lumière qui viennent se briser sur les parois. Il réalise également une expérience avec une fiole remplie de mercure, préalablement vidée de son air, ou pas. Il observe, comme Bernoulli, la production d'étincelles en présence d'air, et au contraire une lumière continue répandue dans toute la fiole quand il fait le vide. C'est en 1706 que Hauksbee fait devant la *Royal Society* son expérience pionnière de production d'électricité par frottement

de la main sur un globe de verre mis en rotation rapide. Cette expérience lui a été inspirée par celle conduite sur la fiole emplie de mercure. Hauksbee exprime clairement, dans son article de 1706 des *Philosophical Transactions*, le fait que la lumière ne provient pas du mercure lui-même, mais du frottement exercé par la masse du mercure sur le verre de la fiole :

[...] *la Lumière produite provient d'une Qualité du Verre, résultant d'une friction ou d'un mouvement qui lui est donné, et non du Mercure en tant que tel, qui n'est rien d'autre qu'un Corps propre à produire la Lumière quand il tombe ou frotte sur le Verre. Et ce qui semblerait corroborer une telle conclusion, c'est qu'il y a quelque temps, j'ai pris un baromètre au mercure et j'ai frotté entre les doigts la partie supérieure et désertée par le mercure du tube, et une lumière s'en est suivie, sans le mouvement du mercure.*

Ainsi, outre-Manche, il est reconnu dès 1706 que la lumière du baromètre n'est pas une propriété intrinsèque du mercure, mais plutôt le résultat du frottement du mercure, en tant que corps matériel, contre le verre. Dufay, dans son article de 1723, mentionne explicitement l'explication de Hauksbee, sans cependant développer davantage :

En 1708 (en fait, 1706) M. Hauksbee dans les Mémoires de la Société Royale de Londres après avoir décrit un phosphore construit avec un globe vide d'air qu'il faisait tourner rapidement sur son centre & qui par ce moyen rendait beaucoup de lumière lorsqu'on en approchait la main, croit que la lumière des baromètres n'est causée que par la friction du mercure contre les parois intérieures du tube vide d'air grossier.

Dufay cite la critique acerbe faite en 1710 par Hartsoeker de l'explication de Bernoulli. On trouve les arguments de Hartsoeker dans son *Cours de physique*, publié en 1730. Si les pores du verre sont plus grands que ceux du mercure, ainsi qu'il résulte de la théorie de Descartes, le vide qui se fait au-dessus du mercure durant sa descente dans le tube ne devrait-il pas être immédiatement comblé par la matière du premier élément passant à travers les pores du tube ? Par analogie avec ce qui se passe dans une pompe aspirante, Hartsoeker pense que la matière subtile doit suivre de très près la surface du mercure, sans qu'il se crée un vide temporaire au sein duquel l'air subtil puisse s'introduire et entrer en collision avec la matière du premier élément sortant du mercure. De plus, comment une pellicule se formant à la surface du mercure pourrait-elle arrêter la matière du premier élément, alors même que la matière magnétique, bien loin d'être aussi subtile, passe au travers du mercure ? A propos de l'expérience de la fiole, Hartsoeker note que, dans ce cas, la lumière apparaît tout le temps, et pas seulement lorsque le mercure descend. Enfin, comment la matière subtile, qui est au repos au sein du mercure, peut-

elle acquérir la vitesse requise pour produire la lumière au contact de l'air subtil sans recevoir de choc ? Au final, Hartsoeker juge que « *la raison physique que M. Bernoulli donne de la lumière du Phosphore mercuriel est embarrassée & défectueuse* ».

On trouve dans le Journal des Savants de 1717 une note de lecture sur un mémoire publié en 1716 par Jean-Michel Heusinger sur le phosphore mercuriel. Heusinger note que Boyle, dans ses traités de 1680 et 1681 sur les phosphores, ne mentionne pas ce phénomène. Les conclusions qu'il tire d'une soixantaine d'expériences effectuées par lui-même recourent pour l'essentiel celles de Bernoulli. Plus le mercure est purgé de l'air extérieur, plus le verre utilisé est propre, plus les secousses sont vives, plus la lumière produite est intense. Heusinger observe au microscope qu'un globe de mercure « *de la taille d'un grain de coriandre* », s'il est pressé, se divise en une myriade de petits globules. Quand on secoue le mercure, la matière subtile présente dans les interstices entre les globules « *recevant par l'agitation du mercure, différentes vibrations, pousse les globules du second élément de Descartes avec assez de vitesse, pour exciter la sensation de lumière, dans un lieu obscur* ».

Jean-Jacques Dortous de Mairan, dans sa *Dissertation sur les Phosphores et Noctiluques* (1717), mentionne le phosphore mercuriel en ces termes :

Ce n'est pas seulement l'air grossier que nous respirons, & par rapport auquel uniquement il y a du vide dans le Baromètre, ou dans la Machine Pneumatique, qui fait obstacle à la propagation de la Lumière du Mercure ; un autre air plus subtil, qui tient un espèce de milieu entre l'air proprement dit, & la matière éthérée, & qui entre & sort par les pores du verre, peut encore interrompre ou éteindre le mouvement des corpuscules lumineux. Plusieurs expériences étrangères à mon sujet, ont fait connaître que cet air existe ; mais l'expérience même dont il s'agit ici, prouve l'effet que je lui attribue. Car ce n'est que la surface du Mercure qui devient lumineuse pendant l'agitation, & ce n'est qu'en descendant qu'elle le devient ; parce qu'il n'y a que la surface du Mercure, qui se trouve quelquefois éloignée de ce second air, & que ce n'est que dans les instants de la descente, qu'elle s'en trouve éloignée ; & la raison de cela, c'est que lorsque le Mercure monte dans le tuyau, & qu'il y prend la place de l'air subtil qui en sort, il est poussé & appliqué contre lui ; mais lorsqu'il descend fort vite, il laisse tout à coup dans le tuyau un espace & un vide, que cet air moyen, quoique très délié, ne saurait venir remplir subitement ; ce qui donne le temps aux corpuscules lumineux, plus libres dans ce moment que jamais, de s'élaner hors du Mercure, & de se répandre.

Les expériences « *étrangères à mon sujet* » dont parle Mairan sont celles précédemment décrites sur la suspension de l'eau et du mercure dans des tubes, l'adhérence entre des blocs de

marbre poli, ou encore l'expérience du siphon à jambes inégales. La théorie de Bernoulli constitue donc pour Mairan une nouvelle preuve de l'existence de l'air subtil, qui traverse les pores du verre et dont le poids ne peut donc pas être mesuré par le baromètre, concept qu'il va utiliser pour expliquer la très grande hauteur des aurores boréales dans la théorie qu'il en publie en 1733. Cet air subtil, extrêmement léger et ténu, est en effet considéré comme pouvant s'étendre jusqu'à très haute altitude.

Dufay décrit les expériences qu'il fait lui-même sur la question, pour lesquelles il se fait aider d'un vitrier allemand (Dufay, 1723). Le mercure est introduit dans le tube en trois tiers successifs via un cornet de papier dont l'ouverture est la plus petite possible, et les bulles d'air sont évacuées des deux premiers tiers par chauffage. Un fil de fer muni d'un coton est utilisé durant l'introduction pour nettoyer le tube, et également pour agiter le mercure pendant qu'il est chauffé pour en évacuer l'air. Dufay pense que l'air grossier contenu entre les parties du mercure enveloppe la matière subtile, et l'empêche de sortir du mercure, et que lorsque celui-ci est purgé de son air grossier, la matière subtile peut s'en échapper plus facilement. Il s'exprime ainsi :

Voici donc une explication qui me semble plus naturelle & plus conforme aux expériences que je viens de rapporter. Je suppose qu'il y a dans le mercure, de même que dans tous les autres fluides, beaucoup d'air grossier & de matière subtile. Quant à cette dernière, on ne doute pas qu'elle ne coule abondamment dans tous les corps & pour l'air grossier, on en voit très distinctement sortir les bulles, lorsqu'on prépare les baromètres, ainsi que je viens de l'enseigner. Ce qu'il y a de surprenant, c'est qu'il faut que cet air grossier soit remplacé dans le mercure & voici l'expérience qui m'en a convaincu.

L'expérience en question consiste à comparer la hauteur du mercure dans le tube avant et après chauffage du mercure. Après une dilatation temporaire pendant la phase de chauffage et d'évacuation des bulles d'air grossier, Dufay constate que le mercure redescend exactement au niveau où il se trouvait avant la purge. Il en déduit « *qu'il fallait que cet air ait été remplacé, ou que les espaces qu'il occupait dans le mercure fussent demeuré vides* ». Sa conclusion est que cet air est remplacé par de la matière du premier élément, et qu'en l'absence d'air grossier, cette matière subtile trouve « *moins d'empêchement à sortir* » et sort effectivement avec violence quand le mercure descend, produisant la lumière. C'est ainsi qu'il explique que le mercure purgé de son air est beaucoup plus efficace dans la production de lumière. À la montée du mercure, celui-ci s'emplit de la matière subtile qui en est sortie à la descente, et aucune lumière n'est observée.

Il faut attendre 1746 pour que l'origine électrique de la lumière des baromètres soit explicitement reconnue, celle-ci ayant été de fait pointée par Hauksbee quarante ans plus tôt. Et cette reconnaissance ne vient pas de Dufay, qui pourtant étudie en détail l'électricité dans les années 1730. Ludolff est le premier à étudier de façon systématique l'effet attractif du baromètre lumineux sur les corps légers. Il dit que la première mention de cette expérience aurait été faite par Georg Erhard Hamberger :

Car quoique quelques Physiciens aient vu & démontré, que des fils suspendus à côté du vide d'un Baromètre lumineux, sont régulièrement attirés par le mouvement du Mercure dans le tube [...] il reste néanmoins des personnes à qui ces Expériences semblent douteuses. Je ne saurais dire au juste, qui a le premier découvert l'Expérience en question ; mais elle se trouve rapportée dans le célèbre Hamberger. Ceux qui conservent encore quelque doute à cet égard, allèguent pour cause de l'agitation des fils, le mouvement de l'air externe causé par celui qui fait l'Expérience, quoique cette assertion soit suffisamment détruite par une nouvelle circonstance, c'est qu'en suspendant un petit morceau de papier à un fil, il va s'appliquer contre le tube au moment que le Mercure monte ou descend, & souvent après avoir été ainsi attiré, il demeure attaché une minute ou deux à ce tube avant que son poids l'en détache.

Pour montrer sans la moindre ambiguïté le caractère électrique de la lumière, Ludolff enferme le baromètre dans un récipient en verre qu'il vide de son air, et montre que l'effet d'attraction observé en présence d'air se maintient en son absence. Les petits bouts de papier suspendus au voisinage du tube se collent au baromètre quand le mercure monte et descend, puis sont violemment repoussés après s'être collés. Pour Ludolff, qui cite Hauksbee pour la lumière produite par son globe de verre tournant frotté par la main, et Gray pour ses expériences d'attraction des corps légers dans les phénomènes électriques :

L'attraction des Baromètres étant donc d'une certitude incontestable, on ne saurait douter non plus que cet effet ne doive être rapporté à l'Électricité. On sait en effet qu'elle a lieu toutes les fois : 1. que l'on frotte les corps qui y sont naturellement disposés, 2. lorsque la friction est suivie d'attraction & de répulsion, 3. quand le corps frotté jette des étincelles & de la lumière, 4. dont l'on entend l'explosion & le pétilllement, & 5. enfin lorsqu'on observe que la force attractive se propage & se communique aux Corps voisins. Or toutes ces circonstances accompagnent notre attraction.

De semblables expériences sont faites par Allamand en 1748, confirmant la nature électrique du phénomène des baromètres lumineux.

6. Conclusion

Cette question de l'air subtil met particulièrement en évidence la façon dont des mesures de nombreuses natures différentes (barométriques, lumineuses, de suspension de liquides dans des tubes, de cohésion des corps solides, ...) sont rapprochées en vue de caractériser un fait scientifique jugé fondamental, à savoir ici l'existence d'un air subtil pénétrant les pores du verre, et expliquant de nombreux phénomènes, depuis les aurores boréales jusqu'à la cohésion des corps solides, en passant par le phosphore mercuriel. Aucune des preuves apportées n'est exacte au regard des connaissances d'aujourd'hui, tous ces phénomènes s'expliquant, soit par l'électricité dans le cas du phosphore mercuriel, soit par les forces d'adhésion moléculaire (dites de Van der Waals) dans les autres cas. Cependant, la réflexion collective que ce thème cristallise, se ramifiant en un questionnement qui déborde largement le cadre de la problématique atmosphérique, touchant par exemple le paradigme de l'impulsion extérieure relatif à la gravitation, ou la réflexion sur la cause de la cohésion des corps solides, apparaît d'une grande richesse, déclenchant polémiques et réflexions génératrices d'avancées. Là encore, une différence apparaît entre les communautés anglaises et françaises, l'introduction de nature cartésienne de l'air subtil semblant masquer aux yeux des savants français, ce que, par exemple, un Hauksbee a compris rapidement, à savoir que la lumière du baromètre ne naît pas du mercure lui-même, mais du frottement du mercure contre le verre, le mercure n'intervenant que comme corps mis au contact du verre, ce qui pointe l'origine électrique du phénomène. On voit pareillement Wallis et Halley douter de l'interprétation par l'existence de l'air subtil, et Halley dire ne pas comprendre la logique de Descartes qui associe à une matière en mouvement vers le haut (l'éther), le mouvement vers le bas des corps soumis à la gravité. Mais les hypothèses sur l'existence de l'air subtil faites par exemple par Huygens, à propos de la suspension de l'eau et du mercure à grande hauteur, ou Bernoulli, au sujet du baromètre lumineux, même si elles peuvent paraître de pure imagination, sont génératrices d'expériences qui, d'une part conduiront à abandonner plus tard ces hypothèses, d'autre part contribueront à améliorer la connaissance scientifique générale. Par exemple, la théorie des aurores boréales de Mairan aurait été difficile à rendre compatible avec la relativement faible hauteur de l'atmosphère déduite de la durée des crépuscules, si la présence d'un air subtil d'une grande légèreté n'avait pas fourni le maillon nécessaire à la cohérence globale de cette théorie, théorie génératrice par elle-même d'avancées, comme on l'a vu. Autre exemple, d'une nature différente : la suspension des liquides dans les tubes à grande hauteur, qui a été interprétée par

Mariotte, non comme la preuve de l'existence de l'air subtil, à laquelle il ne croit pas, mais comme matérialisant les forces de cohésion tenant ensemble les parties du mercure, ce qui est l'interprétation correcte. Il ne fait aucun doute que cette problématique large de l'air subtil, qui a mis en relation différents savants, de domaines d'expertise variés, a joué un rôle important dans l'évolution de la pensée de l'époque, en dépit du caractère éminemment spéculatif de l'idée qui les a fédérés, et qui par elle-même n'a pas eu de suite.

Chapitre 7. L'illusion lunaire

1. Introduction

On trouve dans l'Encyclopédie méthodique (1819) à l'entrée HAUTEUR DE L'ATMOSPHERE, quatre méthodes pour mesurer celle-ci : l'observation des aurores boréales, la pression de l'air, le crépuscule, la courbure apparente du ciel. Cette dernière méthode est issue d'une considération faite par Pierre-Simon de Laplace dans son Exposition du Système du Monde (1796) :

Si l'œil pouvait distinguer et rapporter à leur vraie place les points de la surface extérieure de l'atmosphère, nous verrions le ciel comme une calotte sphérique, formée par la portion de cette surface que retrancherait un plan tangent à la Terre, et comme la hauteur de l'atmosphère est fort petite relativement au rayon terrestre, le ciel nous paraîtrait sous la forme d'une voûte surbaissée. Mais quoique nous ne puissions pas distinguer les limites de l'atmosphère, cependant les rayons qu'elle nous renvoie, venant d'une plus grande profondeur à l'horizon qu'au zénith, nous devons la juger plus étendue dans le premier sens. À cette cause se joint encore l'interposition des objets à l'horizon, qui contribue à augmenter la distance apparente de la partie du ciel que nous rapportons au-delà ; le ciel doit donc nous paraître surbaissé tel que la calotte d'une sphère. Un astre élevé d'environ 26° semble diviser en deux parties égales la longueur de la courbe que forme depuis l'horizon jusqu'au zénith la section de la surface du ciel par un plan vertical ; d'où il suit que, si cette courbe est un arc de cercle, le rayon horizontal de la voûte céleste apparente est à son rayon vertical à peu près comme 3 est à l'unité ; mais ce rapport varie avec les causes de cette illusion. Les grandeurs apparentes du Soleil et de la Lune étant proportionnelles aux angles sous lesquels on les aperçoit et à la distance apparente du point du ciel auquel on les rapporte, ils nous paraissent plus grands à l'horizon qu'au zénith, quoiqu'ils y soient vus sous un plus petit angle.

Le problème adressé par Laplace renvoie à l'énigme millénaire de ce qui est aujourd'hui appelé « l'illusion lunaire », à savoir que la lune paraît plus grosse quand elle est proche de l'horizon que lorsqu'elle se trouve plus haut dans le ciel. Laplace assimile la voûte céleste à la surface d'une sphère concentrique à la terre, et attribue l'agrandissement lunaire au fait que notre esprit projette spontanément la lune sur cette voûte, et qu'il la voit donc plus grande à l'horizon, car c'est la dimension absolue de l'image projetée qui fournit à notre esprit la notion de la taille, et non sa dimension angulaire. Laplace caractérise la voûte par l'angle « médian » auquel nous plaçons subjectivement le point que nous jugeons partager en deux parties égales l'arc qui joint

le zénith et l'horizon le long de cette voûte, angle qu'il estime à 26° au-dessus de l'horizon. Plus le rayon de la voûte est petit, plus l'angle médian est petit, et plus l'agrandissement est important. L'absence d'agrandissement correspondrait à un rayon infini, et à un angle médian de 45°. Il est possible de calculer la hauteur au zénith de cette voûte, que l'auteur de l'article assimile à la hauteur de l'atmosphère, calcul que Laplace ne présente pas dans son texte. Voici ce qu'en dit l'auteur de l'article de l'Encyclopédie :

En supposant que la courbure apparente de la voûte céleste soit concentrique à celle de la surface de la terre, il en résulterait que la hauteur de l'atmosphère serait le cinquième environ du rayon de la terre. Par la méthode du crépuscule, la hauteur de l'atmosphère n'est que le dixième du rayon de la terre : cette dernière méthode donne donc une hauteur moitié de la première. La différence entre ces deux rapports provient de ce que nous ne jugeons, par le crépuscule, que la hauteur de l'atmosphère qui nous réfléchit des rayons de lumière assez forts pour être distingués ; nous jugeons cette hauteur beaucoup trop basse. Par la courbure de la voûte céleste, nous jugeons cette hauteur, d'après l'action que produisent les rayons de lumière provenant de l'ensemble de toutes les molécules qui se trouvent dans chaque direction, & nous déduisons de la courbure apparente une hauteur plus grande que celle qui a réellement lieu. Il est extrêmement probable que la vraie hauteur de l'atmosphère se trouve entre ces deux limites : mais quelle est cette hauteur ? C'est un problème qui n'est pas encore résolu.

On remarque que l'auteur estime le rayon de la terre à dix fois la hauteur déduite de la durée des crépuscules, soit 600 km, le dixième de la vraie valeur. La hauteur déduite du raisonnement de Laplace serait donc plutôt de 1200 km en l'absence d'erreur sur la dimension de la terre. Il prend soin de préciser qu'il faut supposer que la voûte céleste est concentrique à la terre. Il conclut que la hauteur estimée par cette méthode est supérieure à la vraie hauteur, à partir d'un raisonnement difficile à suivre, sur lequel nous reviendrons. Rien n'indique dans ses propos qu'il comprenne que la hauteur ainsi estimée est « subjective », résultant du choix (subjectif) de la valeur de l'angle médian, mais on ne peut néanmoins l'assurer.

L'illusion lunaire, mentionnée dès l'antiquité, et attribuée par Aristote à la réfraction par les vapeurs, constitue un véritable paradigme, objet de très nombreuses théories de différentes natures développées au fil des siècles, de Ptolémée à Alhazen, puis Malebranche et Berkeley. Ce phénomène a incontestablement structuré, tout au moins jusqu'au XVII^{ème} siècle, la pensée scientifique, et généré toutes sortes d'avancées, dans des domaines extrêmement variés, allant de la physique à l'expression picturale, en passant par la physiologie de l'œil. Comme le détaille Enright (1975), il existe trois grands types d'hypothèses pour expliquer l'illusion lunaire :

- 1- Celle d'une origine purement physique, en l'occurrence la réfraction atmosphérique qui agrandirait l'image au voisinage de l'horizon.
- 2- Celle d'une origine physiologique, postulant qu'une entrée physique identique peut produire des images rétiniennes de tailles différentes.
- 3- La théorie post-rétinienne, de nature psychologique, dans laquelle c'est au niveau du cerveau que se crée l'illusion.

Le lien avec la hauteur de l'atmosphère, évoqué ci-dessus, et qui n'apparaît qu'au XVIII^{ème} siècle, en constitue un prolongement intéressant pour notre propos.

Ce chapitre est dédié à l'exposition des différentes théories proposées, avec un appui sur les controverses diverses qui ont agité le XVII^{ème} siècle à ce sujet entre aristotéliens partisans de l'explication réfractive de l'agrandissement lunaire, cartésiens tenant de la théorie des objets interjacentes éloignant subjectivement la lune, en conjonction avec une éventuelle modification de forme de l'œil liée à l'agrandissement de la pupille, et tenants d'une théorie purement psychologique. Dans la deuxième section, nous retraçons l'histoire des approches de l'illusion lunaire de l'antiquité au début du XVI^{ème} siècle. Dans la troisième section, nous décrivons les conceptions développées au XVI^{ème} siècle, autour des trois types d'explication (par la réfraction, physiologique, psychologique) et les débats qui ont agité les communautés de l'époque. La quatrième section est consacrée aux théories de la vision développées au XVIII^{ème} siècle. Dans la cinquième section, nous abordons la question de la hauteur de l'atmosphère estimée à partir d'une mathématisation de la voûte aplatie du ciel, ainsi que le décrit l'article de l'Encyclopédie précédemment cité. Enfin, nous replaçons dans la conclusion cette estimation dans le cadre des estimations faites à partir d'autres méthodes.

2. Historique de la problématique de l'illusion lunaire depuis l'antiquité jusqu'au début du XVII^{ème} siècle

Plug and Ross (1989) présentent un historique détaillé de l'illusion lunaire et des interprétations auxquelles elle a donné lieu, et Lehn (2005) accorde également une large place à ce phénomène dans son histoire de la réfraction atmosphérique. Par commodité, nous désignerons systématiquement l'agrandissement de la lune à l'horizon sous le nom d'illusion lunaire, ces termes présupposant sa nature purement psychologique, qui n'est définitivement admise qu'au XVIII^{ème} siècle. Les premières mentions écrites du phénomène remontent au VII^{ème} siècle av.

J.-C., et l'on en trouve trace également en Chine dès le IV^{ème} siècle av. J.-C. Aristote écrit dans ses Météorologiques (322 av. J.-C.) :

C'est là aussi ce qui fait qu'en mer, les cimes des promontoires paraissent plus élevées, et que les dimensions de tous les objets augmentent quand souffle le vent du sud-est. C'est encore ce qui se produit pour les objets qui paraissent à travers des brouillards ; par exemple, le soleil et les étoiles, quand ils se lèvent ou qu'il se couchent, semblent plus grands que quand ils sont au milieu du ciel. C'est surtout l'eau dans les nuages qui cause les réfractions les plus fortes, et elle en produit quand elle commence à se former plus encore que n'en produit l'air lui-même ; car chacune des parties dont la réunion compose la goutte, est plus encore un miroir que la nuée ne peut l'être.

Le terme d'étoile désigne aussi à cette époque la lune, les planètes, et peut-être les constellations. D'autres, tel Posidonius, Strabon ou Cléomèdes, attribuent également le phénomène aux vapeurs flottant dans l'atmosphère, supposées agrandir l'image de la lune ou du soleil quand ils sont bas sur l'horizon. Ainsi, Cléomèdes, au premier siècle avant Jésus-Christ, s'inspirant probablement de Posidonius, imagine que c'est une région humide de l'air placée à une certaine distance entre l'observateur et la lune qui agrandit son image, tout comme est augmentée l'image d'un objet placé dans l'eau. Cléomèdes ne croit pas que l'air ordinaire, non chargé d'humidité, puisse générer de la réfraction. Celle-ci se produit sur la surface imaginaire, supposée plane et verticale, qui sépare la masse d'air humide, à travers laquelle la lune est vue, et l'air ordinaire, qui entoure l'observateur. Cléomèdes, comme Aristote, pense que les rayons visuels sont émis par l'œil (paradigme dit de l'*extramission*) et, pour lui, un rayon émis par l'œil est réfracté vers la normale à la surface de séparation quand il pénètre dans l'air humide, ce qui implique un agrandissement de la taille apparente de la lune. Ce rayon sort finalement de l'air humide par le haut pour entrer dans l'éther, où il se propage en ligne droite jusqu'à la lune. Selon Lehn, Cléomèdes ne mentionne pas la réfraction qui se produit à la frontière entre l'air et l'éther, et on peut douter du fait qu'il la considère. Cette absence de prise en compte est cohérente avec l'idée d'un agrandissement par la réfraction, puisque cela revient à supposer l'objet physique lune directement immergé dans l'air humide, tout comme le bâton est immergé dans l'eau. L'hypothèse implicite de Cléomèdes est que le degré de réfringence de l'air humide, chargé de gouttelettes d'eau, est équivalent à celui de l'eau liquide. Il faut noter que Cléomèdes a correctement interprété l'éclipse de lune paradoxale mentionnée par Pline, durant laquelle le soleil et la lune étaient tous deux simultanément visibles au-dessus de l'horizon, comme étant due à la réfraction atmosphérique. Ainsi, Cléomèdes attribue à la réfraction un double rôle : celui de déplacer verticalement l'image vers le haut (à partir de son

interprétation de l'éclipse paradoxale), et celui d'agrandir l'image de la lune (à partir de son interprétation réfractive de l'illusion lunaire). Mais Cléomède invoque une deuxième raison à l'illusion lunaire, à savoir ce qui est appelé aujourd'hui le « *principe d'invariance taille-distance* ». Ce principe dit que si nous percevons un objet plus éloigné, à diamètre angulaire donné, nous le percevons aussi plus grand. Il existe deux raisons principalement invoquées pour lesquelles un objet peut paraître éloigné quand il est proche de l'horizon, à savoir la présence d'objets « *interjacentes* », s'interposant entre l'observateur et l'objet, raison reprise notamment par Descartes, et l'apparence estompée de cet objet masqué par une grande épaisseur d'atmosphère, raison cardinale de la théorie de la vision de Berkeley. Lehn signale qu'Aristote reconnaît ce deuxième effet quand il dit que « *dans le brouillard, les choses paraissent plus grandes* ».

Ptolémée, dans le livre I de son *Almageste* (II^{ème} siècle), reprend la théorie de Cléomède, sans cependant le citer. Il explique de la même façon l'illusion lunaire par la réfraction, avec l'analogie de l'objet immergé dans l'eau, ajoutant un nouvel élément, à savoir que l'agrandissement apparent de l'objet est d'autant plus grand que l'objet est profondément immergé. Selon Lehn, Ptolémée comprend mieux le phénomène de la réfraction, mais ne propose pas de modèle pour représenter la lune agrandie par la réfraction. Dans son *Optique*, Ptolémée ne mentionne pas l'effet de la réfraction, privilégiant l'explication psychologique : « *les mêmes distances angulaires semblent à l'œil plus grandes près de l'horizon, et plus petites au voisinage du zénith* ». Il écrit notamment (Raynaud, 2010) :

Des objets situés en un même lieu, ceux qui sont plus brillants semblent plus proches. Dans ces sortes d'illusions, le critère pour voir [la distance de] l'objet estompé n'est pas la longueur du rayon, mais la différence [d'éclat] des couleurs. De la même façon, la position des objets lumineux [...] est estimée plus proche, tandis que les objets peu éclairés apparaissent plus éloignés quoique plus proches. C'est pourquoi, les peintres choisissent pour les objets qu'ils veulent montrer plus éloignés des couleurs nébuleuses et voilées.

Lorsque des objets sous-tendent des angles égaux à des distances égales, celui qui a la couleur la moins vive apparaît plus grand [...] L'objet dont la couleur est plus estompée apparaît plus éloigné et du même coup est estimé plus grand.

Il suggère aussi que, lorsqu'on regarde un objet dans des conditions inhabituelles, par exemple en orientant le regard vers le haut, l'œil a plus de mal à pousser ses rayons visuels (dans le paradigme de l'extramission), ce qui réduit la sensation visuelle et diminue la taille apparente

d'un objet vu haut dans le ciel. Le penseur arabo-musulman Alhazen (XI^{ème} siècle), bon connaisseur de l'Optique de Ptolémée, tout en reprenant l'explication opto-géométrique par la réfraction (mais suivant le paradigme de l'*intromission*, c'est-à-dire de rayons provenant du corps lumineux et entrant dans l'œil) comme une cause « *accidentelle* », au sens aristotélicien, est le premier à élaborer une théorie psychologique détaillée du « *ciel aplati* » (la voûte surbaissée évoquée par Laplace) rendant compte du phénomène. Pour lui, l'uniformité de la couleur du ciel fait qu'on le pense plan et horizontal. Il écrit, dans le livre VII de son *Optique* :

La vue n'éprouve pas la concavité de la surface du ciel, qu'elle perçoit plane, et croit les astres disposés sur cette surface. Elle perçoit par conséquent des astres distincts et égaux comme ayant des tailles inégales, parce qu'elle rapporte à une grande distance l'angle au centre de l'œil sous-tendu par l'astre proche de l'horizon, alors qu'elle rapporte à une petite distance l'angle sous-tendu par l'astre situé au milieu du ciel. Ainsi, elle percevra l'astre proche de l'horizon plus grand que l'astre [situé] au milieu du ciel ou proche du zénith. [...] C'est là une erreur de la vue constante et permanente parce que sa cause est constante et permanente.

L'illusion réside donc dans un problème de jugement de la taille, celle-ci étant perçue par inférence à partir du diamètre angulaire, de la position et de l'évaluation de sa distance. Elle résulte d'une erreur de l'appréciation des distances. Si l'on juge la lune plus éloignée à l'horizon qu'au méridien, on projette mentalement son image sur une surface plus lointaine qu'elle ne l'est au méridien, et on se la représente donc plus grande. Les nombreuses explications du phénomène qui ont été données depuis plusieurs siècles ont pour la plupart en commun que c'est effectivement l'appréciation de la distance à dimension angulaire donnée qui est à l'origine de l'illusion. Par ailleurs, le rôle des objets interjacentes dans l'illusion de la distance est déjà souligné par Alhazen (Raynaud, 2010) :

Nous disons que la vue perçoit tout astre au zénith plus petit qu'en n'importe quelle autre région du ciel dans laquelle l'astre voyage [...] et que l'astre paraît plus grand à l'horizon. [...] Nous avons montré que la vue ne perçoit et ne certifie la grandeur des distances des objets que si ces distances sont jalonnées d'objets contigus et rapprochés. [...] Mais les distances des astres ne sont pas jalonnées d'objets contigus. Par conséquent, la vue ne peut pas percevoir et certifier leurs grandeurs, mais seulement les conjecturer en assimilant la distance des astres à celle des objets terrestres très éloignés qu'elle peut percevoir et dont elle conjecture la grandeur.

La perception d'un ciel, non pas sphérique mais aplati, et la perception d'éloignement résultant de la présence des objets interjacentes, sont deux manifestations distinctes de la même illusion,

qui coopèrent pour éloigner subjectivement l'astre à l'horizon de l'observateur. On trouve chez Alhazen, selon Raynaud (2010), de multiples explications de l'illusion lunaire. En particulier, l'atténuation par l'atmosphère de la couleur et du caractère lumineux des objets, constitue un facteur physique qui joue dans l'estimation de la distance, et donc de la taille, comme l'avait déjà remarqué Ptolémée, et avant lui Aristote. La relation entre l'illusion lunaire et l'atténuation atmosphérique sera remarquée par Léonard de Vinci, l'inventeur de la notion de perspective aérienne, et théorisée par Berkeley, ainsi que nous le développons plus loin.

Par ailleurs, Alhazen maintient comme cause accidentelle le grandissement de la lune, par analogie avec celui des objets vus dans l'eau. Mais, après une première théorie opto-géométrique basée sur la réfraction, Raynaud (2010) suggère que Alhazen a glissé vers une théorie purement psychologique, n'expliquant plus le grandissement des objets vus dans l'eau par la réfraction. Alhazen écrit en effet : « *si l'objet visible est dans le brouillard ou la poussière, et si l'œil est situé dans l'air pur, la vue percevra la taille de l'objet plus grande qu'en réalité, de la même façon qu'elle perçoit les objets dans l'eau* ». C'est donc plutôt à l'atténuation de l'image par le milieu interposé (brouillard et poussière dans le premier cas, eau dans le second cas) qu'il semble imputer le grandissement apparent de l'image. Alhazen dit encore : « *Quant au grandissement [des astres] à l'horizon, nous ne le percevons pas à cause de leur proximité et de leur distance réduite par rapport à nous, mais parce qu'une vapeur humide qui entoure la terre s'interpose entre notre œil et eux, et c'est pourquoi ils sont vus ainsi, exactement comme ce qui est jeté dans l'eau est vu plus grand, et qu'il paraît plus grand à mesure qu'il s'enfonce* », et à propos de la conception de Ptolémée : « *Ptolémée ne compare pas le grandissement des astres à l'horizon aux objets jetés dans l'eau à cause de ce qu'il a montré dans l'Optique [i.e. la réfraction], mais assimile plutôt [les astres] à ce qui est jeté dans l'eau parce que les choses sont ainsi* ». Raynaud note à quel point le caractère intégrateur de la théorie de Alhazen, combinant facteurs psychologiques (ciel aplati, objets interjacentes) et physiques (extinction atmosphérique), a favorisé son application à l'expression de la distance dans le domaine pictural.

La théorie psychologique du ciel aplati d'Alhazen s'installe solidement dans le monde médiéval, sans que pour autant soit abandonnée l'explication physique par la réfraction. Roger Bacon écrit dans son Opus Major (1267) :

Le fait que les étoiles, pour une raison constante, semblent plus grandes au lever et au coucher que lorsqu'elles sont au méridien, est énoncé par Ptolémée dans le troisième et le cinquième livre, et par Alhazen dans le septième. Cela s'explique par le fait que la vision juge le ciel comme s'il s'agissait d'une figure plane étendue au-dessus de la tête à l'est et à l'ouest, lorsque l'œil regarde vers l'une ou l'autre de ces directions. Mais ce qui est vu près de la tête semble plus proche, et donc une étoile, lorsqu'elle est au méridien semble plus proche, et lorsqu'elle est à l'horizon, plus éloignée. Mais ce qui semble plus éloigné semble plus grand, puisqu'il est vu sous le même angle, tout comme en fait ce qui est plus éloigné est plus grand, puisque vu sous le même angle avec un objet plus petit.

À la même époque, Vitellion, un moine polonais, reprend le modèle de Ptolémée. Il ne réalise pas lui-même de mesures de la réfraction, ni ne cherche de loi mathématique pour la représenter, et reprend les tables des réfractions de Ptolémée. Vitellion établit un modèle de réfraction en représentant une couche de vapeur limitée aux régions proches de l'horizon contenue dans la couche d'air pur représentant l'atmosphère, et introduit trois réfractions successives, entre l'éther et la partie haute de l'atmosphère, puis entre cette partie haute et la couche de vapeur, puis entre cette couche de vapeur et la partie basse de l'atmosphère. Invoquant, comme Cléomède et Alhazen, l'analogie avec l'agrandissement des objets dans l'eau, et attribuant aux vapeurs seules la capacité de réfracter la lumière, il ne réalise cependant pas de calculs à partir de son modèle, et s'en tient à une approche purement qualitative. Comme Alhazen, Vitellion mentionne l'explication psychologique par l'invariance taille-distance, mais de façon moins appuyée.

Au tournant du XVII^{ème} siècle, l'interprétation psychologique de l'illusion lunaire, à laquelle Alhazen a donné toute son envergure, est assez bien reconnue. Kepler ne s'intéresse pas à l'illusion lunaire en tant que phénomène physique. Il rejette l'idée de vapeurs s'élevant à l'horizon qui, par réfraction, agrandiraient l'image de la lune, car pourquoi ces vapeurs seraient-elles toujours présentes au-dessus de l'horizon de l'observateur, et jamais au-dessus du lieu où il se trouve ? Par ailleurs, Kepler est, selon Arago (1855), le premier, dans ses « *Additions à Vitellion* » (1604), à déduire la nécessité de l'aplatissement du disque solaire au voisinage de l'horizon du fait que la réfraction doit relever davantage le bord inférieur du soleil, plus proche de l'horizon, que son bord supérieur. Vitellion avait, au XIII^{ème} siècle, correctement affirmé que les diamètres des astres sont diminués par la réfraction, mais il ajoutait que les disques gardent leur forme circulaire. Scheiner, quelques années plus tard (1617), affirme lui aussi la contraction suivant la verticale du diamètre solaire, qui ne peut être parfaitement rond qu'au zénith, et en comprend le lien avec la réfraction. Ainsi, il devient clair dès le début du XVII^{ème}

siècle, pour quelques astronomes avertis, que la réfraction n'agrandit pas les astres sur l'horizon, mais au contraire rend leur image plus petite, en forme d'ellipse dont le grand axe est parallèle à l'horizon. Kepler s'intéresse à la vision, et développe des théories sur la rétine pour expliquer divers phénomènes, comme le fait que, malgré l'inversion de l'image sur la rétine, le haut et le bas ne sont pas inversés sur l'image perçue par le cerveau, ou que le croissant éclairé de la lune paraît de plus grand diamètre que sa partie sombre. Il reprend les idées de Alhazen quant à la perception de la distance, et de la taille des objets. Il donne une interprétation correcte de l'illusion lunaire, basée sur la forme du « segment de sphère » des cieux (voûte du ciel aplati), ainsi que le décrit Mac Laurin dans son Exposition des découvertes philosophiques de M. le Chevalier Newton (1749) :

[...] suivant l'observation de Kepler, les cieux nous paraissent, non comme un dôme hémisphérique, mais comme un Segment de Sphère, moindre que l'Hémisphère ; nous sommes accoutumés à attribuer une valeur réelle, plus considérable aux objets vus à une grande distance près de l'Horizon, qu'à ceux d'une grandeur égale apparente (ou qui ont des images égales sur la rétine) vus dans une situation fort élevée au-dessus de l'Horizon ; et par là, il explique ingénieusement, pourquoi la Lune nous paraît plus grosse à l'Horizon qu'au Méridien.

3. L'illusion lunaire au XVI^{ème} siècle

3.1 Hypothèse d'un agrandissement par la réfraction due aux vapeurs

On peut lire dans le *Traité de la Sphère du Monde* du Sieur Boulenger, Lecteur ordinaire du Roi (1628), l'explication suivante, clairement dans l'esprit d'Aristote, à propos de l'agrandissement apparent du soleil et de la lune sur l'horizon :

Le Soleil paraît en l'horizon en forme d'ovale.

Les réfractions sont encore cause de cette apparence, parce que les vapeurs étant plus étendues à la surface de la terre, que vers la partie haute de l'air, les rayons qui partent de l'œil pour aller aux deux extrémités du Soleil, à droite & à gauche, font une réfraction, qui le fait paraître de ce côté-là plus large, & par conséquent lui donne cette figure ovale.

[...]

La Lune paraît vers l'horizon toujours de grandeur excessive.

Quand la Lune se lève & se couche, s'il y a quelques vapeurs étendues sur la terre de toutes parts, elle paraît beaucoup plus grande qu'elle ne fait au milieu du Ciel, à cause que tous les rayons de l'œil, qui vont à sa circonférence, font une réfraction auparavant que d'y arriver, grande ou petite, selon

que les vapeurs sont rares ou denses. Ou bien cela se fait parce que les vapeurs sont comme un miroir dans lesquelles s'imprime l'image de cet astre, qui pour être plus proche de nous que n'est son corps, nous semble plus grande, parce qu'elle est vue sous un plus grand angle.

Le fait le plus notable de cette explication est qu'elle intègre la forme elliptique du soleil à son lever et à son coucher, pointée quelques années plus tôt par Kepler, puis Scheiner. Mais Boulenger reste néanmoins sur l'idée aristotélicienne d'un agrandissement du disque solaire, ce qui implique que la forme elliptique soit acquise à travers un agrandissement horizontal de ce disque. Boulenger reprend par ailleurs l'idée du miroir d'Aristote, et émet une deuxième hypothèse, à savoir que la lune est reflétée par ce miroir, et que l'image reflétée, identique au disque lunaire, mais plus proche, est donc vue plus grande. Boulenger est ignorant des règles élémentaires de l'optique, mais son point de vue est intéressant, montrant la confusion dans laquelle sont plongés de nombreux savants de l'époque sur ce sujet, qui tentent de concilier l'héritage des anciens avec les découvertes des modernes.

Logomontan (1611), à partir de ses nombreuses observations d'éclipses, pense que le diamètre de la lune est anormalement variable. Lors d'une éclipse totale de soleil observée à Bergen, en Norvège, en 1601, des pêcheurs ont vu le soleil déborder de toutes parts le disque de la lune, son diamètre surpassant du quart de sa valeur ordinaire le diamètre lunaire. La lune était alors à son apogée, mais cela ne suffit pas pour expliquer un tel écart. Logomontan relate aussi le cas d'une éclipse partielle de soleil vue à Wittemberg en Allemagne, mais non aperçue plus au nord à Copenhague. Selon Bailly (1779), Logomontan pense que la réfraction agrandit l'image du soleil, et même qu'il ne peut pas se produire d'éclipse totale de soleil dans les régions septentrionales, où le soleil, bas sur l'horizon, est tellement agrandi qu'il ne peut être occulté par la lune (dont il faut donc nécessairement supposer qu'elle n'est pas agrandie dans des proportions comparables, ce qu'apparemment Logomontan ne dit pas). Logomontan, ainsi que le rapporte Delambre (1821), argumente en faveur de l'agrandissement de l'image solaire à partir d'une observation faite sur la mer, donc en présence de vapeurs : « *Si le Soleil en mer, se montre derrière une petite île qui ne le couvre pas en entier, c'est une chose étonnante que la manière dont le Soleil se dilate de chacun des deux côtés* ». Cette comparaison est intéressante, puisqu'elle se rattache directement, bien que probablement à l'insu de l'auteur, aux théories psychologiques de l'illusion lunaire. Mersenne (1625) reconnaît à la réfraction le double effet de faire « *paraître le soleil plus haut qu'il n'est, & sous une figure elliptique, de manière que la raison qui se trouve entre les réfractions se trouve aussi entre les ellipses du Soleil* ». Mais

il ajoute une précision troublante : « *néanmoins si la réfraction est de 39 minutes, l'ellipse sera de 5 minutes ou environ, c'est-à-dire que si le soleil a 34 minutes en son diamètre, le plus long diamètre de l'ellipse en aura 5 davantage, qui feront 39 : ce qu'a remarqué Scheiner au cf chap. 52 de ses réfractions célestes* ». Il est déjà connu à l'époque que le diamètre apparent du soleil est de l'ordre de 32-33 minutes d'arc, valeur proche des 34 minutes mentionnées par Mersenne, et celui-ci, dans la façon qu'il a de présenter le problème, semble dire que la réfraction ajoute 5 minutes à son diamètre horizontal, et donc de fait l'agrandit. Il cite néanmoins Scheiner, qui a indiscutablement compris qu'il s'agit d'un raccourcissement vertical, et non d'un élargissement horizontal. Pierre d'Avity (1643), lorsqu'il affirme « *de même que le Soleil & la Lune avoisinant l'Horizon, paraissent plus grand que près du Méridien à cause de l'épaisseur de l'air, causée par les vapeurs & exhalaisons, les mêmes semblent aussi plus hauts au Cercle Vertical, qu'ils ne sont véritablement* », est d'avis, comme Boulenger, que la réfraction due aux vapeurs et aux exhalaisons, à la fois élève et agrandit les astres.

Toute ambiguïté sur la réalité physique de l'agrandissement de la lune et du soleil à l'horizon est levée en 1666 par Adrien Auzout, l'inventeur du micromètre. A la base, ainsi que le décrit l'intendant Petit, qui réalise un tel instrument en 1667 selon les préceptes de Huygens (1659) et Malvasia (1662), le principe de l'instrument est l'adjonction d'un treillis de 16 fils de métal, placé à la distance de l'oculaire convexe telle qu'il apparaisse net à l'observateur. Ce treillis découpe l'objet observé en autant de carrés qu'en contient le treillis. Le treillis est étalonné sur des cibles proches de distances et dimensions connues, comme des murs, et sur le temps de traversée d'étoiles tests. Le problème est que la mesure du diamètre lunaire est rendue imprécise par le fait que les bords lunaires tombent entre les filets. Pour éviter l'imprécision liée à l'interpolation à l'œil, Auzout réalise un système dans lequel un filet coulissant, et un filet fixe, sont ajustés sur les deux bords lunaires (ces filets sont en pratique des cheveux). La position du filet est mesurée sur l'échelle des lignes grâce à un microscope. Petit construit un instrument plus versatile avec deux filets coulissants. Auzout et Picard réalisent ainsi de nombreuses mesures des diamètres de la lune et du soleil. Dans sa lettre de 1666 à Oldenbourg, président de la *Royal Society*, Auzout annonce une précision de 3 ou 4 secondes d'arc. Dans son billet du 4 janvier 1667, Auzout annonce avoir compris l'augmentation du diamètre de la lune observée par Hevelius durant une éclipse de soleil qui s'est produite au voisinage de l'horizon en juillet 1666, à savoir que la lune, devenant plus haute sur l'horizon dans le courant de l'éclipse, s'est rapprochée de l'observateur. Petit écrit à ce sujet, dans une lettre à un père jésuite publiée dans le *Journal des Savants* de 1667 :

La grandeur des Diamètres du Soleil & de la Lune, quand ils sont près de l'Horizon : vous serez bien étonné de voir une chose qui paraît incroyable & qui est pourtant très véritable. C'est qu'encore que la Lune nous paraisse beaucoup plus grande étant proche de l'horizon que quand elle est fort élevée au-dessus ; néanmoins quand on la mesure, elle se trouve moindre, & plus elle s'élève, plus son Diamètre s'agrandit, quoique les yeux & le sens commun jugent du contraire. Ce qui est une vérité nouvelle, ou du moins renouvelée, puisque Kepler l'avait observé dans son Astronomie Optique page 360. Pour la raison de cette apparence & de la tromperie de nos sens, je la tiens plus difficile à trouver que les plus grandes Équations d'Algèbre [...]. Mais pour le véritable agrandissement du diamètre de la Lune à mesure qu'elle s'élève sur l'Horizon, et quand je ne l'aurais vue ni lue dans Kepler, je le devrais croire y faisant réflexion, quoique pas un Auteur que lui (qui ne l'a touché qu'en passant, & M. Hevelius qui a écrit à M. Payen que dans l'Éclipse solaire de Juillet dernier le Diamètre de la Lune était plus grand à 8 heures qu'à 7) ne l'ait jamais assuré positivement que je sache : au contraire, ils ont tous suivi l'apparence des sens.

Et, en effet, la lune est plus éloignée de l'observateur d'un demi-diamètre terrestre quand elle se trouve à l'horizon, et sa taille augmente donc quand elle s'élève au-dessus de l'horizon. Petit indique que la lune est éloignée de 60 demi-diamètres terrestres quand elle est à l'horizon, et de seulement 59 lorsqu'elle est au zénith. Cette variation relative de $1/60^{\text{ème}}$, donc de l'ordre de 30 secondes d'arc, est tout-à-fait accessible à la précision du micromètre, capable de résoudre le dixième de cet écart.

Dans son *Cours de philosophie ou Système général selon les principes de M. Descartes*, Pierre-Sylvain Régis (1691) réaffirme la vérité de l'hypothèse réfractive. Il commence par critiquer les explications par un agrandissement de l'image rétinienne qui se sont fait jour au XVII^{ème} siècle, notamment par la voix de Gassendi, sur lesquelles nous reviendrons. Il attribue à la surface convexe des vapeurs, concentrique à la terre, un effet de loupe qui fait que les rayons réfractés de la lune, se rapprochant de la perpendiculaire, en augmentent la taille apparente, fidèle à la doctrine aristotélicienne. Au fait des mesures d'Auzout, qui montrent que la dimension angulaire de la lune est un peu plus petite à son lever, il imagine que « *la lunette dont on se sert pour la mesurer, augmente moins à proportion de son image, lorsqu'elle est sur l'horizon, qu'elle ne l'augmente quand elle est vers le méridien* ». Autrement dit, les réfractions des rayons lumineux à l'intérieur de la lunette sont plus faibles lorsque celle-ci pointe la lune à l'horizon, que lorsqu'elle est observée au méridien, ce qui se traduit par un étrécissement relatif de l'image de la lune vue par la lunette à l'horizon, qui compense le grandissement dû à la réfraction atmosphérique, et même l'inverse légèrement. Régis ne donne pas de précisions sur

le schéma optique qui le conduit à cette conclusion pour le moins surprenante, comme le remarquera Malebranche.

3.2 Hypothèse d'une origine physiologique par production d'images rétiniennes de différentes tailles

Gassendi, dans une série de quatre lettres, écrites entre 1636 et 1641, composant le *Traité de la grandeur apparente du soleil à son horizon ou à son méridien*, suggère un effet de l'ouverture de la prunelle sur la taille de l'image rétinienne (Bougerel, 1737). Il écrit dans sa lettre à Naudé de 1646 :

La prunelle, qui constamment est plus ouverte dans l'obscurité, l'étant davantage le matin & le soir, parce que les vapeurs plus épaisses sont alors répandues sur la Terre, & que d'ailleurs il en faut traverser une plus longue suite pour regarder à l'horizon, l'image de la lune [entre] dans l'œil & s'y [peint] réellement plus grande.

Son interlocuteur exprime ses doutes sur cette explication, suite à quoi, à travers une série de plusieurs échanges avec différents savants de l'époque, l'hypothèse de Gassendi est mise en doute de façon assez unanime, du fait qu'elle semble ne pas respecter les principes de l'optique. Gassendi est néanmoins suivi dans son hypothèse par Marin Mersenne et Pierre Michon Bourdelot. Dans une lettre datée de 1672, Bourdelot invoque une « *tromperie de nos sens* » en ces termes :

La lune étant proche de l'horizon, n'a qu'une lumière sombre, & peu éclatante, qui ne peut blesser ni fatiguer l'organe de la vue. Ce qui fait que pour regarder alors cet Astre, la Prunelle s'élargit et s'ouvre beaucoup ; & ainsi le nerf optique étant fort étendu au fond de l'œil, il reçoit une plus grande image de l'Objet.

Il mentionne également l'interposition d'objets interjacents comme une raison qui nous fait juger la lune plus éloignée à l'horizon, et de ce fait ouvrir davantage la prunelle pour la voir, car, selon lui, on a tendance à dilater la prunelle quand on cherche à voir un objet lointain. En cela, il dit suivre Descartes qui, dans sa *Dioptrique*, dit la chose suivante :

[...] en quoi la situation aide aussi à nous tromper, car ordinairement ces astres semblent plus petits lorsqu'ils sont fort hauts vers le midi que lorsque, se levant ou se couchant, il se trouve divers objets entre eux et nos yeux qui nous font mieux remarquer leur distance ; et les astronomes éprouvent assez,

en les mesurant avec leurs instruments, que ce qu'ils paraissent ainsi plus grands une fois que l'autre ne vient point de ce qu'ils se voient sous un plus grand angle, mais de ce qu'ils se jugent plus éloignés, d'où il suit que l'axiome de l'ancienne optique, qui dit que la grandeur apparente des objets est proportionnée à celle de l'angle de la vision, n'est pas toujours vrai.

[...] la raison qui les [les corps blancs ou lumineux] fait paraître plus proches est que le mouvement dont la prunelle s'étrécit pour éviter la force de leur lumière est tellement joint avec celui qui dispose tout l'œil à voir distinctement les objets proches, et par lequel on juge de leur distance, que l'un ne se peut guère faire sans qu'il se fasse aussi un peu de l'autre, de la même façon qu'on ne peut fermer entièrement les deux premiers doigts de la main sans que le troisième se courbe aussi quelque peu comme pour se fermer avec eux. Et la raison pourquoi ces corps blancs ou lumineux paraissent plus grands ne consiste pas seulement en ce que l'estime qu'on fait de leur grandeur dépend de celle de leur distance, mais aussi en ce que leurs images s'impriment plus grandes dans le fond de l'œil [...]

Le premier paragraphe de l'extrait ci-dessus exprime la théorie psychologique du rôle des objets interjacentes, qui éloignent subjectivement l'astre à l'horizon, et l'éloignant, le font paraître plus grand, théorie que Descartes reprend à son compte. Mais Descartes, suivi en cela par Rohault (1696), ajoute à l'explication psychologique une explication physiologique à propos des corps lumineux, qui selon lui nous forcent, lorsque nous les regardons, à rétracter la pupille et par un mouvement réflexe accommoder à une distance plus faible (autrement dit loucher). La dernière phrase du deuxième paragraphe dit que, par cet effet d'accommodation, un corps blanc ou lumineux paraît plus grand, puisque les axes visuels de nos yeux convergent vers une zone proche et le placent de fait plus près. Cette question rejoint celle du croissant de la lune éclairée par le soleil, qui paraît d'un plus grand diamètre que sa partie cendrée, question dont nous avons vu qu'elle a intéressé des savants comme Kepler. Le fait que ce corps paraisse plus grand est dû pour Descartes à un agrandissement de l'image rétinienne par saturation des filets du nerf optique, qui vont réagir au stimulus principal au détriment des stimuli plus faibles émis par l'environnement de l'objet. Descartes en veut pour preuve le fait qu'une étoile, en dépit de sa distance, paraît un objet étendu et rond. L'idée sous-jacente, en termes modernes, est que la lumière des corps lumineux diffuse au niveau de la rétine, bavant sur des filets adjacents qui ne se trouvent pas directement exposés. Ainsi Descartes, bien au fait des règles de l'optique, n'attribue pas la variation de taille de l'image rétinienne à celle de la taille de la pupille par un effet de nature opto-géométrique, contrairement à Gassendi. Bourdelot, à l'appui de l'hypothèse physiologique de Descartes, mentionne le fait qu'un enfant à qui on fait regarder le soleil se met instinctivement à loucher, comme si le soleil était devant son nez, ce mouvement étant concomitant avec l'étrécissement de sa prunelle. Par ailleurs, il remarque, comme

beaucoup d'autres avant lui, qu'à distance égale, un objet paraît plus grand quand il est vu dans la pénombre, donc qu'il apparaît lumineux sur un fond sombre, que lorsqu'il est vu dans la lumière, donc qu'il apparaît sombre sur un fond clair, ce qui lui semble confirmer la théorie physiologique de Descartes. Bourdelot échange une correspondance avec Ignace-Gaston Pardies à ce sujet. Pour ce dernier :

[...] la grandeur de la prunelle n'augmente pas l'image , mais seulement [...] la rend plus forte, en ce qu'elle laisse passer plus de rayons de l'objet. Cela [...] se peut rendre visible par l'expérience des verres convexes objectifs de Lunettes. Car, qu'on en fasse l'ouverture plus grande ou plus petite, les Images qui se peignent dans le Foyer, où l'on peut mettre un Papier pour les y remarquer, ne sont pas pour cela plus grandes ou plus petites.

Bourdelot répond qu'il n'y a pas que l'ouverture de la pupille qui joue :

[...] cette ouverture est toujours accompagnée [...] d'un certain changement de figure de l'humeur Cristalline, qui cause de telles réfractions dans les Rayons, qu'ils ne manquent jamais de proportionner le diamètre des images à celui de l'ouverture de la Prunelle.

Ainsi, pour Bourdelot, c'est la modification de l'humeur cristalline (donc du cristallin convexe réfractant les rayons) par l'ouverture de la prunelle qui fait varier la taille de l'image sur la rétine, et en cela il va plus loin que Gassendi. La raison est que « *l'ouverture de la Prunelle ne peut se rétrécir pour recevoir moins de rayons, sans presser l'humeur cristalline par les côtés, & sans la rendre, en la pressant, plus longue & plus voûtée* ». A contrario, lorsque la prunelle se dilate pour recevoir plus de rayons, le cristallin se fait moins convexe et l'œil s'allonge, autrement dit la rétine s'éloigne du cristallin. Selon Bourdelot, l'illusion lunaire provient du fait que la pupille se dilate quand on fixe la lune à l'horizon, car elle est plus sombre et aussi parce que les objets interjacent nous la font paraître plus lointaine, et que cette dilatation rend le cristallin plus plat et l'œil plus long, par un effet qu'on nommerait aujourd'hui d'accommodation, agrandissant selon lui la taille de l'image de l'objet sur la rétine. Bourdelot se heurte, comme Régis quand il cherche à expliquer l'illusion lunaire par la réfraction, à la question de l'observation faite par Auzout du fait que le diamètre de la lune n'est pas plus grand à l'horizon, et même est un peu plus petit. Son argument est que l'œil regardant dans la lunette voit à la fois la lune et le treillis du micromètre, et que le même facteur de dilatation, sur la rétine, s'applique à l'image de la lune et aux carrés du treillis (désigné ci-dessous par « *la Machine* »):

[...] si vous considérez que la Prunelle beaucoup ou peu ouverte pour regarder la Lune au travers de la Machine, est également ouverte pour regarder la Machine même ; parce qu'elle regarde toujours la Lune, & la Machine tout à la fois. Car enfin, si la Lune est à l'Horizon ; comme pour la regarder, la Prunelle s'ouvre beaucoup, elle ne peut en voir la Lune plus grande, sans voir la Machine plus grande aussi. Et si la Lune est plus élevée ; comme pour la regarder, la Prunelle s'étrécit, elle ne peut en voir la Lune plus petite, que la Machine de même ne paraisse plus petite ; parce que la vue compare toujours la Lune avec la Machine.

William Molyneux, dans un article des *Philosophical Transactions* de 1686, critique Gassendi, mais aussi Faber et Hevelius, jugeant, d'après les règles de l'optique, que l'ouverture plus ou moins grande d'un télescope ne modifie pas l'angle au sommet du cône de visée, faisant seulement apparaître les objets dans le champ plus ou moins brillants. Il mentionne également « un abbé français » (qui est Pierre Bourdelot), dont il reproduit l'explication en termes de modification du cristallin et de forme de l'œil :

Lorsque la lune est proche de l'horizon, par comparaison, ici, avec des objets interposés, nous sommes susceptibles de l'imaginer beaucoup plus loin de nous, que lorsqu'elle est plus élevée ; et donc, dit-il, nous disposons nos yeux comme pour voir un objet plus loin de nous ; c'est-à-dire que nous agrandissons un peu la pupille, et rendons ainsi le cristallin plus plat ; de plus, l'aspect sombre de la lune, dans cette position, fatigue moins la vue ; et par conséquent la pupille sera plus grande, et le cristallin plus plat : donc une image plus grande sera projetée sur le fond de l'œil, ainsi la lune apparaîtra plus grande.

Il cite des observations du diamètre horizontal de la lune et du soleil faites par Riccioli et Grimaldi avec un sextant qui, contrairement à d'autres observations, dont, selon lui, celles de Bourdelot, montrent un agrandissement significatif à l'horizon (45 minutes d'arc à 1 degré pour le soleil, 38 à 40 minutes d'arc pour la lune). Cependant, pour Molyneux, ces écarts sont trop modestes pour expliquer l'illusion lunaire :

Si les expériences de Riccioli avaient été poursuivies avec précision, il aurait pu les mener quand la lune à l'horizon semble 10 fois plus grande en diamètre qu'à l'ordinaire, et s'il est vrai qu'on puisse la trouver proportionnellement plus grande par la mesure, elle aurait dû alors sous-tendre un angle de 300 minutes, ou 5 degrés ; car très souvent j'ai vu la lune quand elle semblait 10 fois plus grande qu'à l'ordinaire, ce que le petit ajout de 8 ou 10 minutes à son diamètre habituel ne peut en aucun cas réaliser.

Certains savants, comme Molyneux (1686) ou Musschenbroek (1739), ne sont pas convaincus que la suppression des objets interjacentes, par exemple par l'utilisation d'un tuyau au diamètre adapté à celui de la lune qu'on interpose entre l'œil et elle, supprime l'illusion lunaire. Musschenbroek écrit ainsi :

Mais, lorsqu'on les envisage à travers un long Tuyau, ou qu'on mesure leur diamètre avec un Micromètre bien exact, comme ont fait Messieurs Foster, Caswel et Molyneux, ils paraissent également grands, soit qu'ils se trouvent levés un peu au-dessus de l'Horizon, ou à leurs hauteurs méridiennes. On demande donc, & avec raison, pourquoi ces Luminaires célestes paraissent de grandeurs si différentes, lorsqu'on les considère à l'Œil nu.

En conséquence, et ignorant peut-être l'opinion de Wallis qui fait appel à la mémoire pour expliquer que, même si les objets interjacentes ne sont pas vus, ils sont néanmoins placés inconsciemment dans le champ, Musschenbroek opte pour l'explication physiologique de l'agrandissement de l'image sur la rétine, en accord avec l'opinion de Bourdelot :

Comme les Rayons, qui partent de chaque point de l'Objet, sont plus Divergents, lorsqu'ils traversent la Prunelle dilatée, il faut qu'ils se rompent davantage, & alors ils se réunissent en un Point sur la Rétine, ou bien ils se rassembleront en un autre endroit plus éloigné, ce qui nous oblige à éloigner davantage le Cristallin de la Rétine, & par conséquent l'Image qui sera tracée sur la Rétine, devra être plus grande.

Le Cat (1744), comme Musschenbroek, nie l'évanouissement de l'illusion lunaire par l'occultation des objets interposés : « si l'on regarde la Lune à l'horizon par-dessus une muraille, par un tuyau de papier, ou de lunette, on ne voit plus ces montagnes, ces vallées, &c. indices de son éloignement, & cependant on la voit toujours plus grande ». Il croit par contre au lien établi par notre perception entre la confusion de l'image d'un objet et son éloignement : « je vois par-dessus une muraille deux clochers égaux en grandeur ; mais je vois l'un des deux avec cette confusion que donne l'éloignement, tandis que je vois l'autre très distinctement jusqu'aux ornements d'architecture, alors je juge ce dernier très près de moi, & l'autre très éloigné ; & quoique leur image soit de la même grandeur, je décide cependant que le clocher éloigné est beaucoup plus grand que l'autre ». Il donne aussi l'exemple d'un homme qu'on rencontre dans le brouillard, et qui paraît un géant, pour expliquer que les objets vus dans le brouillard paraissent plus grands, remarque dont on a vu qu'elle a été faite par Aristote. Il explique que pour voir un objet éloigné, « l'œil s'accourcit, s'aplatit par les pôles, & s'élargit

suivant son équateur ». Il ne statue pas de façon certaine sur les conséquences de cette modification de la forme de l'œil sur la taille de l'image rétinienne, mais considère comme probable que « *l'œil qui regarde un objet voisin, fait des images plus petites, malgré son allongement, & que l'œil qui regarde un objet éloigné, fait des images plus grandes, malgré son accourcissement* ». L'explication physiologique, même si elle cède le pas aux explications psychologiques au XVIII^{ème} siècle, aura jusqu'à notre époque ses partisans.

3.3 Approche réfractive contre approche physiologique : la controverse entre Malebranche et Régis à la fin du XVII^{ème} siècle

L'approche physiologique, postulant une modification de la taille de l'image rétinienne de la lune liée à la dilatation de la pupille, et/ou à un effet d'accommodation de la vue sur l'objet lointain, constitue une tentative pour attribuer l'illusion lunaire à un effet physique, non pas au niveau de l'interaction entre la lumière de la lune et les vapeurs, mais à celui de l'interaction entre cette lumière et le cristallin. L'invalidation progressive d'un potentiel effet grossissant de la réfraction, contredit à la fois par les observations astronomiques (diamètre plus petit à l'horizon) et par les lois de la réfraction (aplatissement du disque sur l'horizon), amène les scientifiques, tels Gassendi ou Descartes, à imaginer que l'effet se situe à l'intérieur de l'œil. Substituant à l'effet d'une réfraction extérieure à l'œil celui d'une déformation du cristallin et de l'œil, certains savants tentent de repousser l'explication psychologique, qui ne s'accorde pas à leur vision mécaniste du monde. D'autres, tel Pierre-Sylvain Régis, refusent même l'interprétation physiologique, qui supprime dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle l'interprétation réfractive, l'interprétation psychologique ne l'emportant définitivement sur les deux autres qu'au XVIII^{ème} siècle.

La polémique qui oppose Nicolas Malebranche à Régis à la toute fin du XVII^{ème} siècle est emblématique de la résistance des aristotéliens. Pour Malebranche (1678), dont l'explication psychologique de l'illusion lunaire sera détaillée dans la section suivante, la taille de l'image rétinienne ne dépend que de la dimension angulaire de l'objet observé. Ayant noirci à la flamme le pourtour d'un morceau de verre, ne laissant transparent qu'un disque central ajusté à la dimension angulaire de la lune, les objets environnants étant donc occultés, Malebranche a jugé que l'illusion lunaire s'évanouit quand le morceau de verre est interposé entre l'œil et l'objet visé. D'autres observateurs de l'époque, comme Molyneux, jugent au contraire, comme on l'a dit, que l'effet demeure lorsqu'on occulte les objets interjacentes. Malebranche précise que

l'illusion de la distance est créée à la fois par la présence des objets interjacentes et par l'impression du ciel aplati, ces deux causes devant être simultanément supprimées pour que l'illusion disparaisse, ce qui explique peut-être, selon lui, les divergences entre observateurs. Malebranche écrit ceci à Régis (1693) :

Parce que [...] il n'y a point de différence sensible dans ce qui arrive à notre corps, par laquelle nous puissions juger que les Etoiles soient infiniment plus éloignées que la Lune, & celle-ci que les nues ; & l'Horizon nous paraît plus éloigné que le Zénith, parce que le Ciel & les Terres qui sont entre l'Horizon & nous, traçant dans nos yeux leurs images, l'esprit tel que je l'ai supposé, en doit conclure qu'il est beaucoup plus éloigné que le Zénith, entre lequel & nous il ne paraît aucun objet. De sorte que tous les degrés du Ciel apparent diminuent d'autant plus qu'ils approchent davantage du Zénith. Et comme la Lune en quelque endroit du Ciel qu'elle soit, est toujours vue sous un angle d'environ un demi degré, l'esprit, selon les règles de l'Optique, la doit voir beaucoup plus grande à l'Horizon que dans le Méridien.

Régis réagit en exposant deux arguments. Tout d'abord :

Nous répondons qu'il n'y a rien qui soit plus contraire aux Loix de l'Optique que cette explication; & que tant s'en faut que le jugement que nous faisons que les objets sont éloignés contribue à les faire paraître plus grands, il sert au contraire à les faire paraître plus petits.

Ainsi, si nous imaginons un objet plus loin, devrait-il nous apparaître au contraire plus petit. Cette position contredit le principe d'invariance taille-distance posé par Ptolémée, puis surtout Alhazen. Elle suppose implicitement, à l'insu de Régis, un acte de réflexion consciente qui déduise de l'illusion qu'un objet est plus lointain le fait qu'on le voit plus petit. Cette hypothèse est à rapprocher de l'explication de ceux qui notent la contradiction apparente entre le fait que la lune paraît plus grande à l'horizon parce qu'elle paraît plus lointaine, et qu'apparaissant plus grande, elle nous semble de fait plus proche. La réponse faite aujourd'hui à ces opposants au principe d'invariance taille-distance est que le sentiment de la plus grande proximité de la lune à l'horizon du fait de son agrandissement ne tient pas à une perception immédiate, mais résulte d'un raisonnement conscient, cette contradiction n'étant donc qu'apparente. Le deuxième argument de Régis est de nature opto-géométrique :

Dont la raison est, dit-il, que ce jugement dépend d'un mouvement de la prunelle qui est tel, pour voir les objets distinctement, qu'à mesure qu'ils sont plus éloignés elle s'élargit davantage ; est à mesure qu'elle s'élargit l'œil & le Cristallin s'aplatissent. Or il est évident que quand l'œil est aplati les

réfractions sont moindres, & PAR CONSÉQUENT QUE LES IMAGES DES OBJETS QU'ELLES CAUSENT SUR LA RÉTINE SONT PLUS PETITES.

La moindre convexité du cristallin dans la vision à l'infini, se traduisant pas des réfractions moindres, doit se traduire par une diminution de la taille de l'image, au contraire de ce qu'affirment les tenants de l'explication physiologiques. Malebranche réplique à cela que, par analogie avec une lentille convexe, si le cristallin s'aplatit et que la réfraction, en effet, est moins grande, l'image au foyer devient au contraire plus grande. Il affirme que si le cristallin s'aplatit, l'œil doit devenir plus long, et non plus plat, pour que l'image puisse se former sur la rétine. Mais Régis s'entête, et en revient à l'explication par la réfraction :

Pour donner donc une explication plus simple & plus naturelle que les précédentes, nous dirons que la grandeur apparente de la Lune à l'Horizon, dépend principalement des vapeurs qui s'élèvent continuellement en l'air, & qui se disposent en sorte autour de la terre, que leur surface convexe est concentrique avec elle ; d'où il s'ensuit que ces vapeurs causent aux rayons de la Lune des réfractions qui les font approcher de la perpendiculaire, & qui sont propres par conséquent à augmenter l'image de la Lune sur la rétine, par la même raison que les verres convexes font propres à augmenter celles de tous les objets qu'on regarde au travers de ces verres.

Malebranche réfute l'hypothèse réfractive en montrant que, si réellement les vapeurs jouaient le rôle de loupe, l'image de la lune devrait apparaître plus haute que large (elle serait circulaire vue du centre de la Terre). Il décrit en détail l'effet de la réfraction, qui est d'aplatir l'image de la lune sur l'horizon, phénomène parfaitement décrit depuis Kepler. Devant l'ampleur de la dispute, Malebranche fait attester par quatre savants réputés, à savoir l'Hôpital, Catelan, Sauveur et Varignon, que « *ses preuves sont démonstratives & clairement déduites des véritables principes de l'Optique* ». Ainsi, jusqu'à la fin du XVII^{ème} siècle, l'hypothèse réfractive est-elle défendue par les opposants à toute explication non physique, liée au seul jugement subjectif, comme en atteste la définition de l'atmosphère du Dictionnaire Universel précédemment reproduite (cf chap. 2), dont la mention de l'agrandissement de la lune par la réfraction sur l'horizon constitue l'essentiel.

3.4 Explications psychologiques de l'illusion lunaire

Parallèlement aux controverses sur le rôle de la réfraction, la pensée avance sur d'autres fronts au XVII^{ème} siècle. Benedetto Castelli, en 1639, observe dans son *Discorso sopra la Vista* que la Grande Ourse paraît bien plus grande près de l'horizon qu'au zénith. Il s'agit pour lui d'une erreur de jugement, pas d'un effet physique ou physiologique. Cela tient au fait qu'au zénith, on compare la Grande Ourse, par exemple, à la bordure d'un toit, qui fait quelques dizaines de mètres de longueur, alors qu'à l'horizon on la rapporte, par exemple, à une chaîne de montagne, qui peut mesurer des dizaines de kilomètres. Les objets ne jouent pas ici le rôle de repères aiguisant l'effet de la perspective, mais d'éléments dont la dimension physique connue, à partir de l'expérience acquise, influence le jugement sur la dimension d'un objet lointain de dimension inaccessible à l'expérience quotidienne. Le même type d'observation est rapporté par Logan (1735) dans une courte note rapportant son observation d'un lever de soleil au-dessus d'une colline couverte de grands arbres plantés près les uns des autres, au cours duquel plusieurs arbres s'inscrivent en totalité dans le disque solaire, ces arbres, de toute petite taille angulaire (quelques secondes d'arc), mais de très grande taille dans l'absolu et dans la perception que nous en avons par l'habitude, faisant paraître le soleil énorme (≈ 15 fois plus gros d'après Logan). GoÛye, en 1700, exprime la même idée, en comparant le soleil vu derrière des arbres à une colonne cannelée qui, à dimension égale, paraît plus large qu'une colonne lisse.

Gadroys (1675) souligne l'influence de la distance estimée d'un objet sur le jugement de sa grandeur, suivant le principe d'invariance taille-distance et sur le rôle de ceux des objets interjacentes dont on peut juger de l'éloignement par la connaissance préalable que nous en avons. Il fournit une estimation quantitative en jugeant que la lune ou le soleil paraissent élevés d'une demi-lieue dans le plan méridien (2 km), et distants de plusieurs lieues à l'horizon, avec un facteur de grandissement qu'on peut donc estimer, selon lui, supérieur à 4 (valeur obtenue en supposant 2 lieues à l'horizon). Il établit une distinction nette entre le corps et l'instance qui juge de la grandeur de la lune :

[...] ce qui juge en moi n'est pas mon corps, ni rien de matériel. Je ne trouve point étrange au contraire que cette substance qui juge en moi étant distinguée de mon corps, juge quelquefois tout le contraire que ce que les impressions corporelles lui rapportent ; c'est qu'elle use de circonspection, & ne regardant pas la seule image qui est dans l'œil, faisant de plus réflexion sur la distance de l'objet, elle juge que celui qui est plus éloigné est plus grand, quoiqu'il peigne dans l'œil une image plus petite ; en quoi elle ne se trompe pas, mais c'est qu'elle s'est trompée sur la distance.

Molyneux (1686) critique Descartes sur l'hypothèse des objets interjacentes lointains auxquels nous comparons instinctivement la lune quand nous l'estimons plus grande. Il mentionne que la lune qui se lève sur une mer d'huile paraît aussi grosse que celle qui se lève sur une ville, ou un massif rocheux. Il reprend l'hypothèse, dit-il due à Thomas Hobbs, des voûtes concentriques, celle de l'atmosphère et, plus haut, celle de la surface de l'azur, où « *nous imaginons fixées les étoiles* ». Il montre par un argument géométrique que la lune, étant supposée se mouvoir sur cette surface, son extension spatiale sur la voûte au voisinage de l'horizon, à dimension angulaire fixée, doit être plus grande, idée due à l'origine à Alhazen, qu'il ne cite pas. Il mentionne Gassendi et Bourdelot, comme nous l'avons dit, pour critiquer l'hypothèse physiologique de la taille augmentée de l'image rétinienne. Wallis, dans le même numéro des *Philosophical Transactions*, critique sévèrement l'hypothèse réfractive, jugeant que la réfraction ne peut générer d'agrandissement horizontal de la lune vue à l'horizon. En effet, pavant par la pensée l'horizon d'une rangée de disques contigus couvrant la totalité du cercle, un élargissement de ces disques par la réfraction impliquerait un angle total supérieur à 360°, ce qui est géométriquement impossible. Il qualifie l'agrandissement « *d'illusion des yeux* ». Tout cela a été dit par Castelli cinquante ans auparavant, mais reste contesté, on l'a vu, par exemple à travers la polémique opposant Malebranche à Régis à la même époque. Wallis s'accorde avec Descartes sur l'importance des objets interjacentes. Il résout la contradiction soulevée par Molyneux à ce sujet, à savoir que « *la lune qui se lève sur une mer d'huile paraît aussi grosse que celle qui se lève sur une ville* », en faisant intervenir la mémoire pour expliquer l'occurrence de l'illusion lunaire, même en l'absence d'objets interjacentes :

Maintenant, lorsque le soleil ou la lune est proche de l'horizon, il y a entre lui et nous une perspective de collines et de vallées, de plaines, de bois, de rivières, et une variété de champs et d'inclusions ; qui suggèrent à notre imagination une grande profondeur, seule capable d'inclure la totalité de ces éléments. Ou, s'il arrive que dans une certaine position les éléments interjacentes ne soient pas réellement vus, comme nous sommes habitués à les voir, la mémoire nous suggère une vue aussi large que si tout l'horizon était visible. Mais lorsque le soleil ou la lune sont en position haute, nous ne voyons rien entre eux et nous, sauf peut-être quelques nuages, et rien ne vient suggérer à notre imagination une profondeur comparable à celle perçue dans l'autre cas. Et donc, bien que les deux soient vus sous le même angle, ils n'apparaissent pas à l'imagination de la même grandeur, parce que les deux ne sont pas imaginés à la même distance, celui près de l'horizon étant jugé plus grand, parce qu'on le suppose plus loin, que le même lorsqu'il est vu à une plus grande altitude.

Ainsi, Wallis introduit ce que l'on peut appeler un modèle mental de l'anisotropie de l'espace visuel, forgé par l'expérience, en sorte que l'illusion ne dépend plus des circonstances particulières (terrain, objets interjacentes, ...) dans lesquelles la lune est vue. Le Lexicon anglais (1704) mentionne l'illusion lunaire à son entrée MOON et rapporte à ce sujet l'opinion de Wallis, qui fait autorité outre-Manche. Notons que la question de l'illusion lunaire n'est pas abordée à l'entrée ATMOSPHERE du Lexicon, ce qui montre que cette question n'est pas considérée par les anglais comme étant liée à l'atmosphère, le contraire se produisant dans le Dictionnaire Universel d'Antoine Furetière de 1690, où l'illusion lunaire constitue l'essentiel de l'entrée ATHMOSPHERE (cf extrait déjà cité au chapitre 2), mais n'apparaît aucunement à l'entrée LUNE, comme si ce problème était exclusivement atmosphérique, tenant à la réfraction par les vapeurs, et ne concernait pas la lune en tant qu'objet physique.

Nicolas Malebranche développe dans son essai sur les sens publié en 1678 une théorie de la vision. Il recense plusieurs moyens pour juger de la distance d'un objet. En premier lieu, l'angle que font les axes visuels des yeux qui se croisent au niveau de l'objet donnent une indication de la distance. Il s'agit de la vision en volume. Cet angle devient très petit, et ne change plus notablement quand on éloigne l'objet. Nous devons fournir un effort musculaire pour voir un objet proche, le cristallin devant s'éloigner du nerf optique pour qu'on le voit net. Il peut y avoir un changement de convexité du cristallin, mais Malebranche le juge peu probable. Tandis qu'un objet lointain, qu'il soit à 500 pas ou à 10000 lieues, est regardé dans la même disposition des yeux, ne demandant pas d'effort particulier, voir un objet à un ou deux pieds réclame un effort musculaire, et cet effort nous donne une indication sur la distance de l'objet. Ensuite, la grandeur de l'image de l'objet qui se peint au fond de l'œil donne également une indication sur la distance de cet objet, mais cela ne suffit pas à garantir cette distance. Quand on voit un homme au pied d'un arbre à cent pas, on voit l'homme plus petit que l'arbre, et pourtant on voit l'homme et l'arbre à la même distance. Ainsi, « *il faut encore savoir par expérience du sentiment la grandeur de l'objet pour pouvoir juger à peu près de son éloignement* ». Une autre indication réside dans la faiblesse de l'image : « [...] *les objets peu éclairés, ou que nous voyons confusément, nous paraissent plus éloignés qu'ils ne sont, et, au contraire, [...] les corps lumineux, et que nous voyons distinctement, nous paraissent plus proches* ». Enfin, « [...] *l'œil ne rapporte point à l'âme un seul objet séparé des autres, mais [...] lui fait voir aussi tous ceux qui se trouvent entre nous et l'objet principal que nous considérons* », et sur le rôle des objets interjacentes, Malebranche fournit l'exemple suivant :

Quand par exemple nous regardons un clocher assez éloigné, nous voyons d'ordinaire dans le même temps plusieurs terres et plusieurs maisons entre nous et lui ; et parce que nous jugeons de l'éloignement de ces terres et de ces maisons, et que cependant nous voyons que le clocher est au-delà, nous jugeons aussi qu'il est bien plus éloigné et même plus gros et plus grand que si nous le voyions tout seul. Cependant, l'image qui s'en trace au fond de l'œil est toujours d'une égale grandeur, soit qu'il y ait des terres et des maisons entre nous et lui, soit qu'il n'y en ait point, pourvu que nous le voyions d'un lieu également distant, comme on le suppose. Ainsi nous jugeons de la grandeur des objets par l'éloignement où nous les croyons ; et les corps que nous voyons entre nous et les objets aident beaucoup notre imagination à juger de leur éloignement [...].

Il compare ensuite cet accroissement de la distance jugée d'un objet à celle de la durée écoulée depuis un événement passé, celle-ci étant d'autant plus longue qu'il s'est produit plus d'événements depuis cet événement de référence. Et Malebranche de conclure :

De là il est facile de reconnaître la véritable raison pourquoi la lune nous paraît plus grande lorsqu'elle se lève que lorsqu'elle est fort haute sur l'horizon ; car lorsqu'elle se lève, elle nous paraît éloignée de plusieurs lieues et même au-delà de l'horizon sensible ou des terres qui terminent notre vue, au lieu que nous ne la jugeons qu'environ à une demi-lieue de nous ou sept ou huit fois plus élevée que nos maisons lorsqu'elle est montée sur notre horizon.

Il termine son exposé en dénonçant l'erreur de ceux qui attribuent l'illusion lunaire à l'effet de la réfraction atmosphérique, qui se traduit seulement par une contraction verticale du disque. Par ailleurs, il mentionne que la lune est en fait légèrement plus petite à l'horizon du fait de son plus grand éloignement. Il s'étonne du fait que le problème de la lune agrandie sur l'horizon soit considéré par certains comme étant d'une grande difficulté, l'explication psychologique lui paraissant particulièrement naturelle et simple.

Hartsoeker, dans son *Essai de Dioptrique* de 1694, reprend pour l'essentiel l'ensemble des moyens énoncés par Malebranche pour juger de la distance des objets. Il insiste, dans son explication, sur le fait que nous voyons la lune plus proche lorsqu'elle brille au milieu du ciel du fait du contraste :

Et c'est en ceci que l'imagination nous trompe, comme quand nous voyons de loin une montagne exposée au soleil, au-delà d'une allée fort sombre : car alors nous la jugeons bien plus proche de nous qu'elle n'est ; ou de même que lorsque nous voyons la lune beaucoup éclairée, au milieu d'un ciel sombre & noir, comme il arrive ordinairement lorsqu'elle est au méridien : car alors nous la jugeons fort peu éloignée de nous ; au lieu qu'elle nous paraît beaucoup éloignée, quand nous la

voyons près de l'horizon, au travers beaucoup d'air grossier et de brouillards, & avec peu de lumière & de distinction au milieu d'un ciel bien éclairé, quoiqu'elle soit toujours à peu près également éloignée de nous.

Bien qu'il ne nie pas le rôle des objets interjacentes, ni celui de la perception de la figure du ciel aplati, il dit attribuer un rôle central à l'atténuation des contrastes et à l'assombrissement résultant de l'air grossier et des brouillards, qui à lui seul suffirait à générer l'illusion. On trouve dans les *Mémoires de Mathématique et de Physique* de La Hire (1694) des idées analogues, mais avec un appui marqué sur la vivacité de la couleur comme critère de jugement sur la distance, et donc la taille apparente, d'un objet. La Hire applique à la vivacité de la couleur la loi en inverse du carré de la distance de l'intensité de la lumière, mais note que si l'on ne connaît pas la couleur non atténuée d'un corps, il sera difficile de se faire une idée de sa distance à partir de la vivacité observée.

Desaguliers, dans des expériences menées en 1735, et publiées dans les *Philosophical Transactions* (1736), cherche à valider la théorie psychologique de Malebranche. Il compare le ciel nocturne à la voûte d'une église, ou au plafond d'une longue chambre. Il attribue, suivant en cela Alhazen, Hobbs et Molyneux, l'agrandissement de la lune à l'horizon à la projection mentale qu'on en fait sur ce plafond, plus profond à l'horizon qu'élevé au zénith. Dans la première expérience, deux bougies de même grandeur sont placées, l'une à une distance double de l'autre, de l'observateur. Puis on ferme les yeux de l'observateur, et substitue à la bougie deux fois plus éloignée une bougie deux fois plus petite et deux fois plus mince, qu'on place tout près de la bougie la plus proche, juste derrière elle. Lorsque l'observateur, qui n'est pas au courant de l'échange, ouvre les yeux, il exprime son sentiment que la petite bougie est une bougie de grandeur comparable à celle de l'autre, mais deux fois plus éloignée, ainsi que c'était le cas avant qu'il ne ferme les yeux. Desaguliers conclut que, si un objet est jugé deux fois plus éloigné qu'un autre, à taille apparente identique, il est jugé deux fois plus grand, validant ainsi le principe d'invariance taille-distance. Dans une deuxième expérience faite devant la *Royal Society*, il utilise trois boules. Dans un premier temps, deux boules identiques sont placées, l'une à une distance double de l'autre, de l'observateur. Puis, ayant substitué une boule deux fois plus petite, placée juste derrière la boule proche, à la boule éloignée, l'observateur fait la même observation qu'avec les bougies. L'Académie n'est cependant pas convaincue, car certains témoins ne s'y laissent pas tromper. Selon Desaguliers, cela tient à un problème de reflet de la lumière sur la petite boule, plus intense qu'il ne l'est sur la grande, qui trouble la

perception. L'article de Desaguliers présente également en notes de bas de page un historique intéressant, qui fait apparaître les rôles déterminants de la théorie physiologique de Gassendi, de la théorie psychologique de Descartes, Rohault et Malebranche, qui donnent selon lui la solution du problème, de Régis qui défend la théorie aristotélicienne de la réfraction par les vapeurs, des anglais Molyneux et Wallis, le premier jugeant les explications existantes peu probantes, le second partageant pour l'essentiel l'opinion de Malebranche, ainsi que de Riccioli, Grimaldi et Hevelius, dont Desaguliers estime qu'ils ont mis au jour (par leurs observations) la difficulté du problème.

4. Illusion lunaire et théories de la vision au XVIII^{ème} siècle

L'article de l'entrée VISIBLE de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert fournit un bon résumé des connaissances. Il fait le point sur les théories de la vision existantes, à savoir les déformations jointes de la pupille et de la forme de l'œil, l'angle sous lequel un objet est vu, la représentation distincte ou confuse de l'objet, l'éclat ou la faiblesse de sa lumière, autant de concepts hérités du siècle précédent. L'agrandissement apparent du soleil ou de la lune sur l'horizon sont discutés, au regard du fait avéré que la lune est légèrement plus petite à l'horizon à cause de son plus grand éloignement physique. L'héritage de Alhazen, Vitellion, Kepler et Bacon est mentionné. Un appui est mis sur l'effet psychologique d'aplatissement de la voûte du ciel :

Mais on a découvert qu'il n'y a en effet aucune inégalité dans les angles sous lesquels on voit la lune ou le soleil à l'horizon ou au méridien ; & c'est ce qui a fait imaginer à Alhazen, auteur arabe, une autre explication du même phénomène, laquelle a été depuis suivie & éclaircie ou perfectionnée par Vitellion, Kepler, Bacon & d'autres. Selon Alhazen, la vue nous représente la surface des cieux comme plate, & elle juge des étoiles, comme elle ferait d'objets visibles ordinaires qui seraient répandus sur une vaste surface plane. Or nous voyons l'astre sous le même angle dans les deux circonstances ; & en même temps apercevant de la différence dans leurs distances, parce que la voûte du ciel nous paraît aplatie, nous sommes portés à juger l'astre plus grand lorsqu'il paraît le plus éloigné.

L'auteur de l'article partage la conclusion de Malebranche suivant laquelle la suppression de l'environnement visuel de la lune, comme avec « un petit tuyau de papier », fait s'évanouir l'illusion lunaire. Il reprend dans sa conclusion l'opinion de Malebranche suivant laquelle nous « jugeons la lune plus éloignée pour deux raisons : 1^o. à cause que la voûte du ciel nous paraît aplatie, & son extrémité horizontale beaucoup plus éloignée de nous que son extrémité

verticale : 2°. à cause que les objets terrestres interposés entre la lune & nous, lorsqu'elle est à l'horizon, nous font juger la distance de cet astre plus grand ». Il ne met pas en avant le critère sur le caractère estompé d'un objet, ou sa couleur moins vive, qui le font paraître plus éloigné.

L'évêque George Berkeley développe au début du XVIII^{ème} siècle, dans son *Essai sur une nouvelle théorie de la vision* (1709), une conception très complète, qu'il bâtit sur les théories moins avancées de ses prédécesseurs, notamment Malebranche. Ariotti (1973) attribue à Castelli, un physicien du XVII^{ème} siècle dont nous avons précédemment souligné les idées pionnières, un rôle de précurseur de la pensée de Berkeley qui, relativise l'approche opto-géométrique au profit d'une approche purement perceptuelle. Pour Berkeley, les perceptions acquises de la vue, comme extériorité, taille, distance, ne sont pas des perceptions directes, mais des jugements rapidement obtenus par interprétation de signes naturels (approche dont l'illusion lunaire est une illustration parmi d'autres). La signification de ces signes ne nous est enseignée ni par l'instinct, ni par la raison, mais par l'expérience. Pour Berkeley :

Je trouve qu'il est également reconnu que l'estimation que nous faisons de la distance des objets considérablement éloignés, est plutôt un acte de jugement fondé sur l'expérience, que sur le sens. Par exemple, lorsque je perçois un grand nombre d'objets intermédiaires, tels que des maisons, des champs, des rivières et autres, qui, selon mon expérience, occupent un espace considérable, je forme un jugement ou une conclusion selon laquelle l'objet que je vois au-delà d'eux se trouve à une grande distance. À nouveau, lorsqu'un Objet apparaît faible et petit, et que vu de près je l'ai expérimenté comme grand et d'une apparence vigoureuse, je conclus instantanément qu'il est loin. Et cela, c'est évident, est le résultat de l'expérience, sans laquelle, de la petitesse et de la finesse, je n'aurais rien pu déduire concernant la distance des objets.

John Stuart Mill, résumant les apports et l'originalité de la théorie de la vision de Berkeley, écrit à ce sujet (1876) :

Il convient de remarquer aussi que l'impossibilité de voir la distance qui sépare un objet de l'œil (puisque, grande ou petite, elle ne projette qu'un point sur la rétine), bien que l'on ait souvent supposé que c'était une des principales innovations de la théorie de Berkeley, n'était pas, et n'était pas non plus donnée par lui comme une innovation ; mais il l'acceptait dès le début même de son essai comme une vérité admise. Les auteurs qui ont écrit sur l'optique l'avaient déjà reconnu ; mais l'erreur où ils tombaient, et que Berkeley avait pour but de corriger, consistait à croire que nous jugeons des distances par une inférence nécessaire de la raison, d'après des considérations géométriques dont

nous n'avons aucune conscience, ainsi que le disait fort bien Berkeley, et dont la plupart des hommes n'ont aucune connaissance. Toute son argumentation tend à montrer que l'inférence n'est pas donnée par la raison, mais par une association empirique, et que la relation entre nos impressions de la vue et les faits qu'elles indiquent ne saurait être découverte que par expérience directe. C'est ce qui fait de l'analyse que Berkeley a faite de la vision le plus remarquable exemple et le modèle de l'analyse psychologique. C'était pour la première fois que la puissance que possède la loi d'association de donner à des combinaisons artificielles l'apparence de faits ultimes, était mise en évidence.

S'interrogeant sur la façon dont la grandeur des objets est perçue par la vue, Berkeley recense, premièrement, la grandeur ou l'extension de l'objet visible, deuxièmement, la confusion ou l'aspect distinct de l'objet, troisièmement, la vigueur ou la faiblesse de son apparence visible. Les objets très proches sont flous, ou confus, les objets lointains sont sombres. Un objet confus est ainsi estimé de petite taille, car jugé proche ; un objet faible est estimé de grande taille, car jugé lointain ; un objet de grande extension angulaire est jugé de grande taille. La grandeur évoquée par l'extension angulaire d'un objet est modulée par la disposition des yeux, la figure et le nombre des objets interjacentes, et l'information que l'expérience nous a apporté sur la grandeur usuelle des objets :

De plus, les jugements que nous portons sur la grandeur dépendent de la disposition de l'œil, de la figure, du nombre d'objets interjacentes et d'autres circonstances qui ont été observées, pour juger de la grandeur ou de la petitesse tangible d'un objet. Ainsi, par exemple, la même quantité d'extension visible qui, dans la figure d'une tour, suggère l'idée d'une grande hauteur, doit, dans la figure d'un homme, suggérer l'idée d'une hauteur beaucoup plus petite. Ceci en raison de l'expérience que nous avons eue de la grandeur habituelle d'une tour et d'un homme, ce dont je suppose que personne n'a besoin qu'on le lui explique.

Par ailleurs, les critères précédemment énoncés ne sont pas plus liés à la taille plus ou moins grande des objets, qu'à leur distance plus ou moins grande. Ils suggèrent pareillement à notre esprit, du fait de notre expérience vécue, distance et grandeur de l'objet, sans par exemple que l'apparence de faiblesse ou de flou d'un objet soit liée davantage à l'une qu'à l'autre :

Il est également évident que la confusion, la finesse, etc. n'ont pas plus de rapport nécessaire avec une petite ou une grande taille, qu'avec une petite ou une grande distance. Ils suggèrent tout autant la distance que la taille à notre esprit. Et par conséquent, en l'absence d'expérience, nous ne devrions pas plus juger qu'une apparence faible ou confuse est liée à une grande ou une petite taille, qu'elle ne l'est à une grande ou une petite distance.

Ainsi, pour Berkeley, ce n'est pas l'illusion de la distance d'un objet qui crée l'illusion de sa taille, pas plus que l'illusion de la taille de l'objet ne génère celle de sa distance, distance et taille étant indissociables et perçues simultanément, de par la longue habitude que nous avons de voir les objets dans leurs divers contextes. Le commentaire de l'ouvrage de Berkeley paru en 1732 dans la Bibliothèque Italique apporte des éclairages intéressants. L'auteur y affirme que l'âme « *juge uniquement par habitude, fondée sur une expérience constante & uniforme, qui lui apprend que telle disposition des yeux, & tel degré de distinction dans la Peinture, est ordinairement jointe avec telle distance de l'objet* ». Le cas présenté par Barrow d'un objet vu à travers un verre convexe, qui paraît de façon paradoxale d'autant plus proche qu'il est éloigné, s'explique par le fait que la confusion croissante de l'image de l'objet à travers le verre quand on l'en éloigne évoque un rapprochement à une distance si petite que les yeux ne peuvent plus accommoder sur l'objet.

Un aveugle à qui on rendrait brusquement la vue n'aurait, par le moyen de la vue, aucune idée de la distance. Ce fait est confirmé, en 1729, par l'opération d'un jeune homme de 14 ans atteint de cataracte depuis la naissance, faite par le chirurgien Cheselden. Voltaire, dans son essai sur Newton (1738), évoque cette opération, et ses suites, une fois la vue acquise par le patient. Un petit objet mis tout près du jeune homme paraît aussi grand qu'une maison. Il ne peut distinguer avec ses yeux des formes qu'il avait jugées différentes en les touchant avec ses mains. Ce que ses mains sentent être en haut ou en bas, ses yeux ne peuvent discerner s'il est en haut ou en bas. Il lui faut deux mois pour réaliser que des corps solides sont représentés dans les tableaux, et il est surpris de constater qu'en voulant toucher ces corps solides, il ne sent que la surface lisse du tableau. Lequel, du sens du toucher ou de la vue, le trompe, se demande-t-il ? Cette expérience en vraie grandeur, qui vient après l'élaboration par Berkeley de sa théorie, en confirme remarquablement les intuitions. L'étendue visible n'a « *pas d'autre existence que les couleurs ; elle n'est rien, non plus qu'elle, hors de notre esprit* ». L'idée reçue par le toucher de l'objet n'est pas celle reçue par sa vue. « *La liaison de ces deux idées n'est point nécessaire* ». Il faut distinguer par exemple l'image visible de la lune de l'objet tangible lune.

[...] *si l'on dit que l'étendue ou que la figure visible est différente de l'étendue ou de la figure maniable [tangible], il semble qu'il en suivrait cette absurdité, qu'une seule & même chose aurait 1. ou plusieurs étendues, 2. ou plusieurs figures. Mais si l'on y fait mieux attention, on verra qu'on n'en peut conclure autre chose, sinon que l'objet de la vue & celui du toucher sont deux choses différentes, quoique désignées dans toutes les langues par le même nom.*

Le jugement qu'on se fait de la grandeur des objets est semblable à celui qu'on se fait de leur distance. Pour les mathématiciens, la connaissance de l'angle et de la distance détermine la grandeur. Mais chacun, quand il aperçoit la grandeur d'un objet, ne pense pas à l'angle visuel. Grandeur et distance sont vues aussi immédiatement l'une que l'autre, sans que l'une entre dans un raisonnement et l'autre dans une conclusion. La grandeur d'un objet est sa grandeur tangible. La grandeur apparente est reliée à la grandeur de l'image visible. La grandeur tangible est pour nous plus importante que la grandeur visible, car les objets n'agissent sur nous qu'en nous touchant.

Mais comment le sens de la vue nous fait-il découvrir la grandeur maniable [tangible] d'un objet ? Par trois moyens. 1°. La grandeur visible. 2°. La confusion de l'image ou de l'apparence visible. 3°. La force & la clarté de cette apparence. Plus l'image de l'objet peinte sur notre rétine est grande, plus elle est distincte, plus enfin elle est faible, & plus nous jugeons que l'objet est grand.

[...]

Ayant vu, dès l'enfance que le plus de grandeur maniable est toujours joint avec le plus de grandeur visible, le plus de distinction, & le moins de force & de clarté dans l'apparence de l'objet, nous joignons enfin naturellement l'une avec l'autre, sans pouvoir plus les séparer.

Contrairement à Malebranche, et à l'auteur de l'article VISIBLE de l'Encyclopédie, Berkeley ne croit pas que l'occultation du contexte visuel supprime l'illusion lunaire, et il n'accorde pas aux objets interjacentes la capacité de faire paraître la lune plus lointaine. D'autre part, selon lui, la théorie des objets interjacentes ne rend pas compte du fait que « *la Lune paraît plus grande dans un temps épais & nébuleux, que dans un temps clair & serein* ».

Le texte de Voltaire (1738) suit de très près les arguments développés par Berkeley, en y incorporant l'expérience postérieure en vraie grandeur de l'aveugle auquel est rendue la vue. Voltaire établit la même distinction entre l'objet visible et l'objet tangible. Concernant la grandeur et la distance, il les voit comme on voit les sentiments sur les visages des hommes. Quand on voit un homme rougir, soit de honte, soit de colère, on ne sait trancher par la seule couleur, il faut aussi entendre sa voix. Pour lui, comme pour Berkeley « *l'expérience seule nous apprend ce langage [celui de la grandeur et de la distance des objets]. Aussi l'expérience seule nous apprend, que quand un objet est trop loin, nous le voyons confusément et faiblement. De là nous formons des idées, qui ensuite accompagnent toujours la sensation de la vue* ». Il donne l'exemple d'un homme vu de loin sur un toit, qu'on prend d'abord pour une statue, à qui l'on

prête deux pieds de hauteur. Mais pour peu que la statue bouge, on comprend que c'est un homme, et on lui prête aussitôt six pieds.

Il faut absolument conclure de tout ceci, que les distances, les grandeurs, les situations, ne sont pas, à proprement parler, des choses visibles, c'est-à-dire, ne sont pas les objets propres & immédiats de la vue. L'objet propre & immédiat de la vue, n'est autre chose que la lumière colorée : tout le reste, nous ne le sentons qu'à la longue & par expérience. Nous apprenons à voir, précisément comme nous apprenons à parler & à lire.

Il ne suffit pas d'ouvrir les yeux pour voir de la manière dont nous voyons, il faut aussi le secours des autres sens. « *Chacun de nos sens sait la fonction à laquelle la Nature l'a destiné. Ils s'aident mutuellement pour envoyer à notre âme, par les mains de l'expérience, la mesure des connaissances que notre état comporte* ». Et encore : « *Si le Père Malebranche avait envisagé la Nature par ce côté, il eût attribué moins d'erreurs à nos Sens qui sont les seules sources de toutes nos idées* ». Voltaire, comme Berkeley, se distancie de l'approche cartésienne qui attribue aux objets interjacentes, et donc à la géométrie, l'effet de distance dont dériverait l'effet de grandeur, au profit d'une approche davantage basée sur les sens intégrant l'ensemble des éléments de jugement et reposant entièrement sur l'idée d'une expérience préalablement acquise par l'habitude et fondant les proportions de distance et de grandeur de l'espace visuel au sein duquel nous évoluons. La notion mathématique de voûte du ciel aplati, est absente des textes de Berkeley et de Voltaire. L'art, sous l'angle des effets de perspective en peinture, y est par contre omniprésent.

Leonhard Euler, dans ses Lettres à une princesse d'Allemagne (1762), réalise une synthèse entre l'approche mathématique, illustrée par la représentation du ciel sous la forme d'une voûte surbaissée, et l'approche sensorielle de Berkeley. Il ne croit pas en effet à la théorie des objets interjacentes, d'une part parce que selon lui l'illusion ne s'évanouit pas quand on regarde la lune par un trou, d'autre part parce qu'une grande salle vide paraît plus grande que « *si elle est remplie de monde, malgré la quantité d'objets que nous voyons alors entre nous et les murailles* ». Concernant la forme du ciel, il développe l'idée que la voûte imaginaire constituée par le bleu du ciel, qui représente un plafond de l'atmosphère, est aussi celle sur laquelle nous positionnons les astres, ce qui revient à confondre la voûte diurne et la voûte nocturne. Il dit :

D'abord, tout le monde se représente le bleu du ciel comme une voûte aplatie dont le sommet nous est beaucoup plus proche que le bas, où elle se confond avec l'horizon [...]

Cette idée est aussi, sans contredit, une illusion fort grossière, puisqu'il n'y a rien au-dessus de nous qui soit borné ou fermé par une telle voûte.[...] près de la terre, c'est notre atmosphère qui occupe l'espace, et plus loin c'est cette matière beaucoup plus subtile qu'on nomme l'éther.

[...] C'est presque à la surface de cette voûte que nous nous représentons le soleil et la lune avec toutes les étoiles, comme si c'étaient des clous brillants qui y fussent attachés ; [...]

Cela posé, lorsque la lune se trouve à l'horizon, nous la rapportons dans notre imagination au point A [projection radiale de la lune sur la voûte] [...] Mais quand la lune en montant s'approche du zénith, nous l'estimons s'approcher de nous ; et si elle atteignait le zénith, nous jugerions alors sa distance la plus petite.

Cette illusion sur la distance entraîne nécessairement l'autre sur la grandeur. [...]. Peut-être que tous les hommes ne sont pas trop d'accord sur cette proportion : l'un dira que la lune à l'horizon lui paraît deux fois plus grande; un autre, trois fois, et la plupart se déclareront pour quelque milieu entre deux et trois; mais pour la chose même, tous se réuniront.

Du fait qu'il n'accepte pas le principe de l'éloignement suggéré par les objets interjacentes, Euler privilégie l'hypothèse de Berkeley, à savoir que les objets sur l'horizon, moins brillants, paraissent de fait plus lointains. Pour expliquer l'atténuation de la brillance de la lune à l'horizon, il calcule le trajet d'un rayon lumineux dans une couche d'épaisseur 6,5 km, qui est son estimation de la hauteur de l'atmosphère (cf chap. 8). Il trouve 260 km, un trajet considérable qui éteint en grande partie les rayons d'un objet lointain vu sur l'horizon. Il conclut que les objets lointains ont un éclat très affaibli par l'air grossier, les objets très brillants, comme par exemple le feu d'un incendie dans la nuit, paraissant très proche. De la même façon, une salle sombre paraît plus grande qu'une salle claire. Il cite l'application de ces principes à la représentation de la distance en peinture.

5. Courbure apparente du ciel et hauteur de l'atmosphère

Robert Smith, dans son *Compleat System of Optics* (1738) réalise la première modélisation mathématique de la voûte du ciel aplati. Il estime tout d'abord géométriquement la distance de l'horizon, environ 5000 fois la hauteur depuis laquelle l'œil le regarde, soit 10 km vu par un homme dans une plaine parfaitement plane. Tous les objets ou nuages placés au-delà de cette limite semblent ancrés dans la ligne d'horizon. Reprenant la conceptualisation de Alhazen, Smith imagine un plan au-dessus de l'observateur s'étendant jusqu'à l'infini. Ce plan apparaît en fait courbe, puisqu'il rejoint à grande distance l'horizon, lui étant visuellement contigu. La distance apparente du plafond ainsi défini décroît régulièrement de l'horizon jusqu'à la verticale

au lieu de l'observateur. La concavité ainsi perçue, qu'on peut se représenter facilement dans le cas d'un plafond nuageux, est apparente, mais bien sûr pas réelle. Smith dit qu'en l'absence de nuage, on garde en tête la même idée d'une concavité, voire que la réflexion de la lumière par l'air évoque à elle seule cette concavité. On retrouve l'idée exprimée Wallis, selon laquelle la mémoire place des objets dans le champ visuel, même en leur absence, et plus généralement le fait que la représentation que nous nous faisons de l'espace visuel est le résultat d'un long processus d'acquisition d'informations par l'habitude, qui est à la base des théories de la perception développées à l'époque, notamment par Berkeley. Tout comme Euler, quand il dit qu'on se représente le bleu du ciel comme une voûte aplatie, Smith évoque l'idée de la concavité suggérée par la réflexion de la lumière par l'air. Il se pose ensuite la question de savoir où se trouve le centre de l'arc matérialisant la courbure apparente du ciel, centre à partir duquel la courbe de la voûte qui joint le zénith a la même longueur que celle qui joint l'horizon. A partir de l'observation de la lune, du soleil et des étoiles, il place ce centre subjectif à 23° au-dessus de l'horizon, un angle très voisin de celui retenu par Laplace (26°), qui s'en est probablement inspiré. Smith indique que quand le soleil est à 30° d'élévation, la partie supérieure de l'arc paraît moindre que l'autre, et que quand il est à $18-20^\circ$, c'est l'inverse, d'où la valeur choisie. Il indique un grandissement résultant perçu de la lune à l'horizon de 3,3, grandissement qui vaut aussi pour des couples d'étoiles choisis. Ce grandissement d'un facteur 3 correspond bien à l'ordre de grandeur des grandissements généralement perçus, qui sont néanmoins variables en fonction des individus et du contexte du terrain. Camille Flammarion, dans son *Astronomie Populaire* dit que la plupart des personnes placent le point trop bas (par rapport à 45° , angle pour lequel la voûte est sphérique, sa surface se trouvant alors à l'infini), entre 30° et 45° .

A propos de cet angle médian, il est intéressant de faire un détour par les nombreuses expériences réalisées au XX^{ème} siècle sur la question. Certains expérimentateurs trouvent des angles médians plutôt élevés, comme Wagner et al. (1989) : 42° en conditions claires, 38° sous couverture nuageuse partielle, 37° en conditions nuageuses, d'autres plus petits, comparables à ceux adoptés par Smith, ou Laplace, par exemple : $\approx 20^\circ$ (Reiman) ou $\approx 30^\circ$ (Miller, Dember & Uibe) (Enright, 1975) en conditions nuageuses. Les tenants de l'hypothèse de la voûte du ciel aplati (Kaufman et Rock, 2007) notent que, dans tous les cas, le ciel nuageux est perçu comme plus aplati que le ciel clair, le ratio des angles médians étant toujours d'environ 0,9 (ciel aplati/ciel clair). Les expériences directes de comparaison entre le disque lunaire et des disques témoins, avec toutes les difficultés méthodologiques que soulèvent ces expériences, suggèrent

un facteur d'agrandissement subjectif moyen de 1,5 (Kaufman et Rock, 2007), nettement plus petit que le facteur 3 déduit de l'estimation de l'angle médian par Smith, ou Laplace.

Pour revenir au concept même de voûte du ciel aplati, Lausberg (2003) dit la chose suivante en citant Jean Lacroux (Ciel et Espace, 1986) :

Or, derrière les nuages, très loin derrière [...] nous savons que se trouvent les étoiles et nous imaginons que la voûte nuageuse et la voûte stellaire sont « parallèles ». Elles semblent donc toutes deux surbaissées, de sorte que l'horizon nous paraît cinq à six fois plus éloigné que le zénith. De deux objets ayant le même diamètre apparent, celui qui semble le plus éloigné (la Lune dans le cas actuel) paraîtra aussi le plus gros.

Il se dégage ainsi de la vision de Smith et de ses prédécesseurs, et des approches plus récentes, l'idée d'une voûte surbaissée du ciel qui s'applique indistinctement au plafond nuageux, au ciel bleu et au ciel nocturne étoilé, confondus en une seule voûte dont la forme subjectivement allongée s'est forgée au fil de notre expérience de la perception des distances et des tailles des objets. En effet, d'après Slimanek (2002), des expériences de laboratoire faites sur des sujets jeunes entre 4 ans et l'âge adulte montrent que l'illusion lunaire est plus marquée chez les enfants, le jugement des distances horizontales s'améliorant avec l'âge. Pour lui, ce résultat tendrait à montrer que l'anisotropie de l'espace visuel ne peut être totalement innée. Il suppose néanmoins qu'elle pourrait traduire l'importance de la dimension horizontale pour la survie de l'espèce, le cerveau accordant moins d'importance à ce qui se passe au-dessus de nous qu'à ce qui se passe devant nous. Pour Slimanek, les vraies questions à propos de l'anisotropie de l'espace visuel résultant du modèle mental du ciel aplati sont les suivantes :

Pourquoi l'espace visuel est-il anisotrope ? Comment l'anisotropie fonctionne-t-elle concrètement ? Pourquoi la "métrique" de cette anisotropie se déplace-t-elle en réponse à des indices visuels, tels que des objets situés à différentes distances dans le champ de vision, et même en fonction de l'expérience visuelle passée ? Et pourquoi une certaine anisotropie persiste-t-elle même si presque tous les indices visuels de distance sont absents ? Ce sont des questions qui doivent être abordées. Peu de progrès ont été réalisés dans ce sens. Mais nous ne pouvons pas résoudre les illusions sur la lune et le ciel tant que nous n'aurons pas répondu à ces questions.

Selon lui, et selon Kaufman et Rock (1989), la courbure apparente du ciel n'explique pas l'illusion lunaire, pas plus que l'illusion lunaire n'explique la courbure apparente du ciel. Il

s'agit de deux illusions provoquées par les mêmes causes. On trouve cette idée déjà exprimée par Euler dans ses lettres à une princesse d'Allemagne (1762) :

Pour rendre raison de cette voûte imaginaire, on est obligé de dire que cela vient de ce que les objets célestes que nous voyons près de l'horizon nous paraissent plus éloignés que ceux que nous voyons près du zénith ; et c'est sans doute une pétition de principe très formelle que les logiciens ont droit de rejeter comme un vice insupportable dans nos raisonnements. En effet, après avoir dit plus haut que la voûte imaginaire du ciel est la cause qui nous fait paraître la lune à l'horizon plus éloignée que près du zénith, il serait à présent ridicule de dire que ce qui nous fait imaginer cette voûte est que les objets horizontaux nous paraissent plus éloignés que les verticaux.

Il n'était cependant pas inutile de parler de cette voûte imaginaire, quoique nous n'en soyons pas plus avancés pour cela ; et quand j'aurai expliqué pourquoi les objets célestes nous paraissent plus éloignés lorsque nous les voyons près de l'horizon, Votre Altesse comprendra en même temps la raison de cette double illusion universelle, dont l'une est l'agrandissement apparent des astres dans l'horizon, et l'autre la voûte aplatie du ciel.

Tout revient donc à expliquer pourquoi les objets célestes vus à l'horizon nous paraissent plus éloignés que lorsqu'ils se trouvent à quelque hauteur considérable : je dis maintenant que la raison en est parce que ces objets nous paraissent moins brillants ; ce qui m'impose une double tâche, qui est de montrer pourquoi ces objets brillent avec moins d'éclat vers l'horizon, et ensuite d'expliquer comme cette circonstance entraîne nécessairement le jugement d'une plus grande distance.

L'existence d'une anisotropie de l'espace visuel, se traduisant par l'illusion que le ciel est une voûte surbaissée, semble donc relativement bien établie. Les expériences de placement intuitif du point médian, partageant la voûte céleste en deux arcs égaux, conduisent à des résultats variés, mais allant tous dans le sens d'un aplatissement (élévation médiane strictement inférieure à 45°), et d'un excès d'aplatissement dans le cas d'un ciel couvert de nuages. La valeur de 26° estimée par Laplace se situe dans la fourchette basse des valeurs obtenues sur la base d'expériences de terrain au XX^{ème} siècle (20°-40°), ces valeurs semblant dépendre fortement de l'environnement terrestre et céleste, et des individus, voire surtout de la façon dont ces individus sont conditionnés par l'expérimentateur pilote. L'agrandissement subjectif des objets proches de l'horizon se produit aussi bien la nuit (constellations, lune) que le jour (lune, soleil), ce qui tend à montrer que la voûte peut représenter indifféremment le plafond des nuages, le ciel bleu ou encore le fond sur lequel notre cerveau projette les étoiles. En prenant l'angle de 26° estimé par Laplace, ou celui de 23° estimé par Smith, le rayon horizontal de cette voûte est environ 3 fois plus grand que son rayon vertical, qu'on peut transposer directement à l'agrandissement apparent de la lune sur l'horizon. Un grossissement apparent de

l'ordre de 2 à 3 est mentionné par de nombreux auteurs des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle, les expériences de comparaison entre la lune et des cibles artificielles effectuées au XX^{ème} siècle favorisant des valeurs plus faibles, de l'ordre de 1,5 à 2. Les caractéristiques géométriques de la voûte définie par Laplace placent son sommet 1200 km au-dessus du sol. Un agrandissement de 1,75, plus en rapport avec les résultats des expériences de comparaison modernes, correspondrait à une hauteur de 3000 km.

Définir une hauteur apparente de l'atmosphère à partir de notre modèle mental de l'anisotropie de l'espace visuel, ainsi qu'il est fait dans l'Encyclopédie méthodique (1819), est certes possible, même si le sens de cette hauteur n'est pas celui, suggéré par l'auteur de l'article de l'Encyclopédie, d'une borne supérieure à la hauteur vraie de l'atmosphère. Remarquons que, dans le cas d'un ciel nuageux, la hauteur physique des nuages est petite, de l'ordre de 2 à 5 km, dans un rapport de 2 ou 3 à la distance de l'horizon (10 km), assez similaire au rapport d'aspect de la voûte surbaissée du ciel telle que l'entendent Molyneux, Smith ou Laplace, sauf que dans ce cas la forme de la voûte nuageuse qui vient s'ancrer dans la ligne d'horizon est éloignée de la forme sphérique supposée par ces auteurs, consistant plutôt en celle d'un sphéroïde aplati. Plug et Ross (1989) signalent que la forme sphérique supposée est arbitraire, n'étant qu'une hypothèse commode pour pouvoir déduire aisément le facteur d'agrandissement sur l'horizon de l'angle d'élévation médian. Cette remarque souligne le caractère nécessairement très imprécis et fluctuant de l'estimation de la hauteur de la voûte du ciel aplati. Néanmoins, la cohérence relativement bonne entre le niveau d'agrandissement perçu de la lune à l'horizon et la valeur estimée de l'angle médian sur la voûte céleste suggère que notre esprit appréhende effectivement un sommet de la sphère de l'atmosphère aux alentours d'une valeur subjective de ≈ 1500 km.

6. Conclusion

La résistance opposée par les aristotéliens partisans de l'explication réfractive de l'illusion lunaire aux théories physiologiques et psychologiques pendant tout le XVII^{ème} siècle, alors même que les astronomes ne détectaient avec leurs instruments aucun agrandissement, constitue l'une des faits marquants de ce chapitre. Le regain d'intérêt exprimé au XVII^{ème} siècle pour cette question, qui fait couler beaucoup d'encre, alors même que des astronomes de la dimension de Kepler ne s'y intéressent aucunement, est probablement lié aux conceptions mécanistes du monde qui s'imposent alors, incarnées par le système cartésien. Un esprit aussi

éclairé que celui de Descartes ne pouvait souscrire à l'hypothèse d'un agrandissement dû à la réfraction par les vapeurs et exhalaisons présentes au-dessus de l'horizon. Il choisit parmi les explications psychologiques la théorie des objets interjacentes, celle dont la nature géométrique est la plus marquée, et l'assortit d'une explication complémentaire portant sur la variation de l'image rétinienne, conservant ainsi un rôle à la réfraction, mais à l'intérieur de l'œil. Parmi ses deux disciples les plus connus de l'époque, Rohault le suit, mais Régis s'entête et défend *in fine* l'explication par les vapeurs, ce qui l'amène aux positions intenable qu'il prend dans la polémique qui l'oppose à Malebranche. Il est intéressant de remarquer que les théories psychologiques, déjà affirmées par Alhazen et des penseurs du Moyen-Âge tels que Roger Bacon, sont défendues par un grand nombre de savants du XVII^{ème} siècle, mais ne trouvent leur plein aboutissement qu'au XVIII^{ème} siècle avec les théories purement perceptuelles de la vision développées par Berkeley, et à sa suite Voltaire.

Concernant la hauteur de l'atmosphère, sa valeur subjective estimée par la courbure apparente du ciel (celle de sa voûte surbaissée) ne peut se comparer directement aux valeurs objectives déduites de la durée des crépuscules, ou de la hauteur des météores (globes de feu, étoiles filantes, aurores boréales). C'est l'approche mathématisée de Laplace, succédant en cela à Smith qui en est l'initiateur au XVIII^{ème} siècle, qui inspire à l'auteur de l'article de l'Encyclopédie cette méthode pour estimer la hauteur de l'atmosphère, Smith autant que Laplace ne s'en étant pas servi à cette fin. L'auteur, se trompant sur le diamètre de la terre, estime la hauteur calculée selon la courbure apparente du ciel à 120 km, valeur double de celle déduite des crépuscules. Cette hauteur est à la limite compatible avec celle déduite de l'observation des globes de feu, et très au-dessous de la hauteur des aurores boréales estimée au XVIII^{ème} siècle. Comme nous l'avons remarqué, l'auteur de l'article ne semble pas, à première vue, réaliser qu'il s'agit d'une hauteur ressentie, différente par nature de la hauteur de l'atmosphère sensible, estimée à partir de phénomènes physiques qui s'y déroulent. En choisissant le bon diamètre de la terre, l'auteur aurait trouvé 1200 km, valeur encore compatible avec la limite supérieure sur l'altitude des aurores estimée par Mairan. Dans l'explication fournie par l'auteur, l'accent est mis sur le fait que cette hauteur tiendrait compte de l'ensemble des molécules qui nous renvoient la lumière, et cela dans toutes les directions, au lieu que la lumière pendant les crépuscules nous est renvoyée uniquement par les couches ultimes réfléchissant les rayons avec assez de force pour que nous les distinguions, et cela suivant une seule direction déterminée par la position du soleil et la nôtre. L'idée clairement exprimée est que la hauteur perçue de la voûte céleste intègre la totalité de la lumière, provenant de la totalité

de l'atmosphère, dans toutes les directions, et que par cette opération d'intégration globale de toutes l'information, nous « voyons » au-delà de la hauteur fournie par les crépuscules, et ainsi la hauteur trouvée est plus grande que celle déduite des crépuscules. La raison pour laquelle cette hauteur est « *plus grande que celle qui a réellement lieu* » reste par contre obscure. Peut-être traduit-elle que l'auteur a compris qu'il s'agit d'une hauteur subjective, non physique, ou alors le fait, qu'assimilant la voûte du bleu du ciel à la voûte nocturne, nous la repoussons instinctivement plus loin qu'elle n'est, au-dessus de l'atmosphère.

Chapitre 8. Hauteur de l'atmosphère au XVIII^{ème} siècle

1. Introduction

La question de la hauteur de l'atmosphère constitue pendant tout le XVII^{ème} siècle un fil conducteur important du développement de la physique atmosphérique de l'époque. Les efforts des scientifiques, pour l'essentiel français et anglais, mais également italiens, et allemands, notamment, sont tournés vers la mise en cohérence des hauteurs déduites par différentes méthodes : durée des crépuscules, réfraction atmosphérique de la lumière des étoiles, pression de l'air et loi barométrique, aurores boréales, globes de feu et étoiles filantes. Plusieurs matières subtiles sont invoquées pour résoudre les incohérences relevées : matière réfractive (réfraction atmosphérique, pression de l'air - Chap. 2-), matière solaire (aurores boréales, durée des crépuscules - Chap. 3-), matière magnétique (aurores boréales - Chap. 4-), matière électrique (globes de feu et étoiles filantes, aurores boréales - Chap. 5 -), air subtil (aurores boréales - Chap. 6 -). Chacune de ces matières a fait l'objet d'un chapitre du présent ouvrage. Les communautés ont des approches parfois différentes, la matière réfractive imaginée par les cartésiens de l'Académie des Sciences pour expliquer le désaccord entre hauteur réfractive et hauteur déduite de la pression de l'air, n'étant pas invoquée outre-Manche, puisque les physiciens anglais parviennent dès la fin du XVII^{ème} siècle à une vision unifiée, pour l'essentiel correcte, des hauteurs fournies par la durée des crépuscules, la réfraction atmosphérique et la pression de l'air. De la même façon, la communauté scientifique anglaise résiste durant tout le XVIII^{ème} siècle à l'attribution faite par les français de très grandes hauteurs aux aurores boréales en invoquant des biais observationnels, tandis que côté français une modification de la loi des dilatations à haute altitude conduit à revoir la hauteur de l'atmosphère estimée par la pression de l'air et la porter à un niveau compatible avec les grandes hauteurs estimées pour les aurores boréales. La hauteur des globes de feu et des étoiles filantes, nettement supérieure à celle déduite de la durée des crépuscules, conduit, à l'aube du XIX^{ème} siècle, certains savants anglais à accepter le principe de la grande hauteur des aurores boréales, principe qui alors ne fait pas l'unanimité, même à l'Académie des Sciences française. C'est le foisonnement d'idées sous-jacent à la quête du sommet de l'atmosphère que nous retraçons dans ce chapitre, qui constitue à bien des égards une synthèse des précédents.

Nous allons tout d'abord, dans la partie 2, poser les bases de la définition, ou des définitions, de l'atmosphère héritées du XVII^{ème} siècle et recenser les connaissances générales sur la hauteur de l'atmosphère figurant dans un certain nombre de dictionnaires et d'encyclopédies du XVIII^{ème} siècle. Dans la partie 3, nous décrivons deux paradigmes essentiels à la compréhension du contexte dans lequel les études ont été menées, à savoir l'hypothèse française d'une atmosphère inférieure lourdement chargée en vapeurs et exhalaisons, et la question de l'infinité, ou non, de l'extension verticale de l'atmosphère, question philosophique qui n'interfère guère, de fait, avec la recherche de la hauteur de l'atmosphère sensible. Dans la partie 4, nous décrivons les trois grandes incohérences entre les hauteurs déduites par des méthodes différentes : (i) durée des crépuscules et réfraction atmosphérique, (ii) réfraction atmosphérique et pression de l'air, (iii) pression de l'air et aurores boréales, et la façon dont ces incohérences ont été résolues. La partie 5 est consacrée à deux méthodes complémentaires pour estimer la hauteur de l'atmosphère : (i) globes de feu et étoiles filantes, (ii) projection de l'ombre de la terre durant les éclipses de lune. La conclusion montre comment, à partir des différentes lignes de pensée, se dégage l'idée d'une atmosphère stratifiée en fonction de critères et de considérations physiques.

2. Définition et hauteur de l'atmosphère au XVIII^{ème} siècle

2.1 Définition de l'atmosphère au XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles

Nous avons détaillé dans le chapitre consacré à la matière réfractive la genèse de la représentation de l'atmosphère au XVII^{ème} siècle. Au tournant du XVII^{ème} siècle, l'air est supposé se répartir autour de la Terre en trois régions, une région basse chauffée par les rayons du soleil, une région haute également chaude car au contact de l'élément feu, une région intermédiaire absorbant le froid repoussé par la chaleur des régions contigües. Cette région intermédiaire est celle où prennent naissance la pluie, la grêle, la neige, ou encore le tonnerre et la foudre. Des échanges permanents de vapeurs et d'exhalaisons ont lieu entre les régions basse et intermédiaire. Les exhalaisons sèches, qui ont le pouvoir de s'enflammer (météores lumineux) s'élèvent jusqu'à la région haute, tandis que les vapeurs humides demeurent en bas. Cette conception, héritée d'Aristote, n'est pas partagée par les stoïciens, qui ne reconnaissent pas l'éther d'Aristote comme cinquième élément, et privilégient l'air et le feu parmi les quatre éléments fondamentaux (la terre, l'eau, l'air et le feu). Pour les stoïciens, dont le principal

représentant est Jean Pena, la substance de l'éther ne diffère de l'air terrestre qu'en degré de pureté. Kepler partage cette vision, et accepte l'idée que la substance des cieux soit l'air, mais il s'agit pour lui d'un air spirituel, consubstantiel au corps, source de vie et de mouvement des astres. Par la suite, il introduira une frontière physique de densité entre l'éther (ou un air très pur), et l'air ambiant de l'atmosphère, et calculera la hauteur de cette atmosphère, qu'il trouvera égale à 3,6 km, à partir d'un modèle de réfraction quantitatif, le premier jamais réalisé.

Le terme *Atmosphaera*, ou « globe des vapeurs », pour qualifier la couche d'air qui enveloppe la Terre, apparaît au début du XVII^{ème} siècle sous la plume de Snell, qui traduit en latin les versions en néerlandais des œuvres antiques et médiévales réalisées par Simon Stevin, un mathématicien et ingénieur de Bruges soucieux de populariser le savoir scientifique des anciens. Stevin s'intéresse à la détermination de la hauteur des vapeurs par les savants arabes à partir de la durée du crépuscule, et le mot atmosphère désigne précisément pour lui la région dont cette méthode des crépuscules fournit la hauteur. La méthode consiste à estimer l'altitude des couches supérieures de l'atmosphère qui réfléchissent la lumière du soleil lorsque celui-ci est couché, la nuit ne devenant noire que lorsque le soleil franchit un angle limite de 18° au-dessous de l'horizon. On considère à l'époque que l'air, étant invisible, est complètement transparent et ne peut réfléchir la lumière, contrairement à la matière grossière des vapeurs et des nuages qui est tenue pour responsable de cette réflexion. La hauteur de ces couches, ainsi qu'estimée au XI^{ème} siècle par Ibn Mu'adh, est de l'ordre de 80 km. Elle sera ramenée à 70 km par la Hire au début du XVIII^{ème} siècle en tenant compte de la réfraction atmosphérique. Cette hauteur est jugée trop grande par certains aristotéliens, qui notent que le sommet des nuages est fréquemment observé au-dessous des pics montagneux, donc à une altitude beaucoup plus petite, et qui plus généralement doutent de la pertinence de la démarche mathématique pour représenter le fonctionnement de la nature. Kepler lui-même, convaincu de la finesse de l'atmosphère, suite à son calcul basé sur la réfraction atmosphérique, rejette la valeur déduite de la durée des crépuscules. Mais il existe tout au long du XVII^{ème} siècle un courant de pensée selon lequel l'air s'étend très loin au-dessus de l'air impur chargé de vapeurs et d'exhalaisons terrestres. La nature de la matière qui surmonte l'air impur fait l'objet de nombreuses interrogations : s'agit-il d'un air pur, air débarrassé des impuretés terrestres, ou bien de l'éther, ou encore du feu, ou tout simplement du vide ? Des savants comme Jean-Dominique Cassini estiment que « *chaque astre a une atmosphère qui s'étend fort loin, et qui se mêle avec les atmosphères des autres astres* ». Marin Mersenne déclare que « *l'air est continu depuis la terre jusques au firmament, & peut-être par-delà jusques à l'infini* » et Samuel de Sorbières que

« *l'étendue de l'univers n'est autre chose que la rencontre des Atmosphères* ». Ainsi, l'hypothèse d'une espace planétaire rempli par les atmosphères des planètes qui l'occupent, s'étendant très loin de leur centre, et donc d'une atmosphère de fait infinie, est présente dans les esprits à cette époque.

La définition de l'atmosphère qu'on trouve dans le Dictionnaire Universel d'Antoine Furetière (1690), déjà énoncée (cf chap. 2), pose clairement la distinction entre l'air du bas, chargé d'impuretés, et qui est responsable de la réfraction de la lumière des astres, et la région éthérée qui se trouve plus haut. L'atmosphère ainsi définie est la réunion de la région basse et de la région intermédiaire suivant la conception héritée d'Aristote prévalant au début du XVII^{ème} siècle, la région haute au contact de l'élément feu n'apparaissant pas dans la définition du Dictionnaire Universel et devant être assimilée à la région éthérée. La croyance dans le fait que c'est la réfraction de la lumière par les vapeurs qui fait paraître la lune plus grande quand elle est basse sur l'horizon (phénomène dit de *l'illusion lunaire*, cf Chap. 6), est, nous l'avons vu, encore prégnante au tournant du XVIII^{ème} siècle. La polémique qui oppose à ce sujet Malebranche à Régis à la fin du XVII^{ème} siècle est emblématique des résistances qui se manifestent à l'encontre des théories faisant appel à une origine physiologique ou psychologique de la lune augmentée. L'estimation de la hauteur de l'atmosphère à partir de la mesure de la réfraction atmosphérique, faite par Kepler au début du XVII^{ème} siècle, puis Cassini un demi-siècle plus tard, conduit à une très petite hauteur (3,6 km), et il est donc naturel d'attribuer la réfraction aux couches basses chargées d'impuretés. Certaines théories développées au XVIII^{ème} siècle, comme celle de Hartsoeker, attribuent de fait aux particules solides un rôle prépondérant dans la réfraction atmosphérique.

L'entrée ATMOSPHERE du *Dictionnaire géographique et critique* de Bruzen la Martinière, édité en 1726, est déjà beaucoup plus fournie que celle du Dictionnaire Universel de 1690, et presque exclusivement consacrée à la question de la hauteur de l'atmosphère, qui devient au début du XVIII^{ème} siècle un sujet d'étude majeur. L'article débute par la définition suivante :

On entend par ce mot la région inférieure de l'air, laquelle enveloppe la terre tout à l'entour, & où s'élèvent les exhalaisons, les brouillards, les nuées et les vents. L'air qui est au-delà est nommé l'Æther ou la matière Ætherée. C'est dans l' Atmosphère que se forme la réfraction de la lumière que nous envoient les Étoiles fixes & les Planètes, & ce sont les vapeurs qui font paraître la Lune plus grande quand elle se lève, que quand elle est au Méridien. L'Atmosphère a donc une étendue bornée, & et elle est terminée à une certaine distance dans laquelle il y a deux choses à considérer ; le poids,

& la hauteur, l'une pourrait se conclure de l'autre si elle était également dense partout ; mais cela n'est pas.

On y trouve deux idées essentielles. Tout d'abord, l'atmosphère est la partie de l'air mélangée aux vapeurs et aux exhalaisons terrestres, et c'est au sein de cet air grossier, ainsi qu'il est couramment désigné à l'époque, que se produit la réfraction de la lumière, idée très ancienne comme nous l'avons vu. La deuxième idée est que l'atmosphère a une étendue bornée, cette limitation procédant logiquement du fait qu'au-delà d'une certaine hauteur, les vapeurs et exhalaisons terrestres ne sont plus présentes, on se trouve donc en dehors de la zone d'influence de la Terre, dans l'éther. Suivant cette conception, l'atmosphère n'est en effet autre chose que « *l'Æther, mêlé avec les vapeurs, & les exhalaisons de la Terre* ». Ce modèle d'une atmosphère chargée d'exhalaisons surmontée par l'éther est celui qu'a utilisé Kepler pour estimer la hauteur de l'atmosphère à partir des mesures de réfraction atmosphérique. Néanmoins, entre-temps, le caractère pesant de l'atmosphère a été découvert par Torricelli, et Boyle et Mariotte ont démontré que le volume occupé par une masse d'air varie en fonction inverse du poids de l'air qui le comprime, et que l'atmosphère n'est donc pas également dense à toutes les hauteurs.

La définition de l'atmosphère se diversifie dans le courant du XVIII^{ème} siècle. L'entrée ATMOSPHERE du *Dictionnaire de physique* (1793) fournit le détail des différentes définitions données à l'atmosphère :

On pourra donc maintenant savoir ce que signifie le mot d'atmosphère terrestre, car c'est le nom qu'on donne à l'air qui environne la terre, c'est-à-dire, à ce fluide rare & élastique dont la terre est couverte partout à une hauteur considérable, qui gravite vers le centre de la terre & pèse sur sa surface, qui est emporté avec la terre autour du soleil, & qui en partage le mouvement tant annuel que diurne. [...]

On peut encore entendre proprement par atmosphère, l'air considéré avec les vapeurs dont il est rempli. [...]

Par atmosphère, d'autres entendent ordinairement la masse entière de l'air qui environne la terre : cependant quelques écrivains ne donnent le nom d'atmosphère qu'à la partie de l'air proche de la terre qui reçoit les vapeurs & les exhalaisons, & qui rompt sensiblement les rayons de lumière. [...]

L'espace qui est au-dessus de cet air grossier, quoiqu'il ne soit peut-être pas entièrement vide d'air, est supposé rempli par une matière plus subtile qu'on appelle éther, & est appelé pour cette raison, région éthérée ou espace éthéré.

On note que la hauteur de l'atmosphère y est qualifiée de « *considérable* », et que l'atmosphère, pour certains, n'est pas seulement la partie proche de la terre chargée d'impuretés, autrement

dit l'air grossier, mais l'ensemble de cet air grossier et d'un air dépourvu de vapeurs, présent à plus haute altitude. Ainsi, la représentation de l'atmosphère et de l'espace planétaire a évolué au cours du XVIII^{ème} siècle d'une représentation à deux compartiments : air grossier - éther à un système tripartite : air grossier - air pur - éther, l'atmosphère s'étendant à une grande hauteur du fait de sa composante d'air pur.

2.2 Connaissances générales sur la hauteur de l'atmosphère

L'article du *Dictionnaire géographique* de 1726, après avoir posé la définition de l'atmosphère, explique qu'il n'est pas possible d'estimer la hauteur de l'atmosphère à partir de la loi de décroissance de la pression de l'air déduite de la loi de Boyle-Mariotte, car « *tout ce qu'on peut découvrir du rapport des condensations de l'air au poids, est renfermé dans des observations faites fort près du Globe de la Terre, & qui ne tirent guère à conséquence pour l'air pris à des hauteurs beaucoup plus grandes* ». Il faut donc utiliser un autre moyen pour estimer cette hauteur, et ce moyen est la durée du crépuscule, lorsque le soleil se trouve à moins de 18° au-dessous de l'horizon, question de Philippe de la Hire a étudié en grands détails, montrant que les couches les plus hautes de l'atmosphère, réfléchissant la lumière du soleil durant le crépuscule, se trouvent vers 70 km d'altitude. L'auteur de l'article cite ensuite le globe de feu qui a traversé le ciel de l'Italie en 1676, dont la hauteur a été estimée à 60 km. On ne peut pas douter, selon lui, que « *ces feux ou météores ne soient formés par des exhalaisons sulfureuses, qui sortent de la Terre, & qui venant à s'enflammer, pèsent beaucoup moins que la partie de l'air dont elles occupent la place : mais quelque légères qu'elles soient elles ne laissent pour cela d'être plus pesantes que l'Æther, que nous considérons sans aucune pesanteur* ». En conséquence, elles s'élèvent jusque « *sur la surface de l'atmosphère où elles nagent tant qu'elles durent ; ainsi la hauteur de ces feux doit être la même, que celle de l'atmosphère* ». Les 60 km de hauteur du globe de feu de 1676 corroborent, selon l'auteur, les 70 km de hauteur de l'atmosphère déduits de la durée des crépuscules.

On trouve à l'entrée HAUTEUR de l'*Encyclopédie méthodique*, publié près d'un siècle plus tard (1819), une section détaillée consacrée à la hauteur de l'atmosphère, définie comme la « *hauteur présumée de la limite supérieure de l'atmosphère qui environne la terre* ». L'auteur de l'article juge que « *l'atmosphère terrestre ne s'étend pas jusqu'aux corps du système planétaire* », opinion qui n'est pas partagée par tous les physiciens au XVIII^{ème} siècle. Il se base sur le fait que le mouvement des corps planétaires n'éprouve pas de diminution appréciable, et

donc que le milieu dans lequel ils se meuvent ne leur oppose pas de résistance sensible, les corps se déplaçant dans l'air atmosphérique se voyant au contraire opposés une résistance de sa part. L'atmosphère ne s'étendant pas à l'infini, tout au moins dans des proportions sensibles, il vient naturellement qu'elle doit avoir une limite supérieure. Mais quelle est la hauteur de l'atmosphère ? Cette question, nous dit l'auteur, n'est pas encore complètement résolue. Sont décrites ensuite quatre méthodes différentes pour déterminer cette hauteur : « 1°. par la distance de la terre à laquelle se trouvent quelques-unes des aurores boréales que l'on aperçoit ; 2°. par la pression que l'air exerce sur la surface de la terre, estimée par la hauteur du mercure dans le baromètre ; 3°. par la durée du crépuscule ; 4°. par la forme apparente de la voûte céleste ».

Concernant l'aurore boréale, l'auteur prévient le lecteur : « Jusqu'à présent on a regardé l'aurore boréale comme un météore lumineux, produit dans l'atmosphère terrestre. Si cette opinion était prouvée, il serait possible, par deux ou plusieurs observations correspondantes, faites sur l'aurore boréale, à des distances extrêmement éloignées, de déterminer la hauteur où ce météore existe, et par suite celle de l'atmosphère ». Des observations simultanées de structures aurorales spécifiques depuis des points suffisamment distants à la surface de la Terre, permettant une estimation de la hauteur par la méthode de la parallaxe, sont requises, mais de telles observations n'ont pas été faites aussi souvent qu'il était souhaitable. Des estimations grossières ont été faites à partir de la dimension de la zone géographique d'où une aurore est globalement visible. La grande aurore de 1726, visible à la fois de Saint-Petersbourg et de Lisbonne, doit avoir eu, pour qu'il en soit ainsi, une élévation de l'ordre de 1000 km. Des observations en grand nombre faites à de plus petites distances ont conduit Mairan à estimer une élévation comprise entre 400 km et 1200 km, suivant les aurores. L'auteur de l'article pose néanmoins deux questions à ses yeux fondamentales : « 1°. les aurores boréales, observées en même temps dans des lieux aussi éloignés, étaient-elles les mêmes ? 2°. ce météore a-t-il effectivement lieu dans l'atmosphère ? » La réponse à la première question provient des descriptions fournies par les observateurs des arcs auroraux, dont on estime la hauteur du sommet en leur milieu, qui permettent de vérifier que c'est bien la même structure qui est observée par les différents témoins. Concernant la seconde question, le fait que « l'aurore boréale suive visiblement les mouvements divers de l'atmosphère terrestre », remarquée par Mairan, et d'autres, suggère fortement le caractère atmosphérique de l'aurore. « Ce qui paraît assez certain, c'est que si le phénomène se passe dans l'atmosphère, la hauteur doit être de deux ou trois cents lieues ». L'auteur mentionne ensuite au passage les uranolites (globes de

feu), dont il dit que leur observation pourrait apporter potentiellement des informations intéressantes sur la hauteur de l'atmosphère, en suggérant de davantage s'intéresser à ces objets.

La découverte du caractère pesant de l'air, et l'utilisation du baromètre pour équilibrer le poids de l'air par celui d'une colonne de mercure, a conduit à l'estimation de la hauteur d'une colonne d'air faisant équilibre à la hauteur de la colonne de mercure. À partir du rapport de densité entre le mercure et l'air, Boyle a déterminé que la hauteur de la colonne d'air d'une atmosphère qui serait supposée homogène est de l'ordre de 10 km, valeur qui a été ensuite ramenée à 8 km lorsque le rapport des densités a été précisément connu. Mais le caractère compressible et dilatable de l'air, découvert par Boyle et Mariotte, qui ont montré que le volume d'une masse d'air est en proportion inverse du poids d'air qui le comprime, fait que les tranches d'air correspondant à une même hauteur de la colonne du mercure, doivent aller en augmentant à mesure que l'on s'élève. Mariotte a ainsi montré que, « *si l'air est susceptible de se raréfier 4032 fois plus qu'il ne l'est à la surface de la Terre, l'atmosphère aura quinze lieues de hauteur* », soit 60 km. Si l'air peut se raréfier huit millions de fois, l'atmosphère s'étend jusqu'à 120 km de hauteur. Des calculs faits par Edmond Halley de façon différente, en appliquant les logarithmes à la loi de dilatation, prévoient « *qu'à la hauteur de quarante et un milles [65 km], l'air occupe déjà 3000 fois plus de place qu'ici-bas ; mais il est probable que ses ressorts ne peuvent pas subir une beaucoup plus grande extension, & que l'atmosphère ne doit pas s'étendre au-delà de quarante-cinq milles [72 km]* ». Néanmoins, la loi de dilatation de l'air est modifiée par la température et l'humidité, ainsi que le suggèrent les observations. De plus, en appliquant la loi de Boyle-Mariotte, la hauteur devient infinie pour une pression nulle, ce que certains savants n'acceptent pas, car l'atmosphère doit selon eux avoir une hauteur finie. Ils en concluent que la loi de Boyle-Mariotte ne s'applique probablement pas à l'air très dilaté des grandes hauteurs, cette méthode ne permettant donc pas d'estimer de façon certaine la hauteur de l'atmosphère.

La troisième méthode est celle déjà mentionnée dans le *Dictionnaire géographique* de 1726, à savoir l'estimation de la hauteur des dernières couches réfléchissant la lumière du soleil durant les crépuscules. L'auteur de l'article retient un angle limite au-dessous de l'horizon de 20°, plus grand que l'angle de 18° couramment admis, et donne une estimation de la hauteur de l'atmosphère de seulement 60 km. Selon lui, « *la seule conclusion que l'on puisse tirer de la hauteur de l'atmosphère déduite du crépuscule, c'est que, à cette hauteur, il existe des tranches d'air capables de réfléchir assez de lumière pour que cette lumière soit sensible à la vue* ». La

quatrième méthode, dite par la courbure apparente du ciel, fournit une hauteur subjective, celle d'une « *voûte surbaissée* » (cf chap. 7), plus profonde vers l'horizon que vers le zénith, sur laquelle nous projetterions instinctivement les objets célestes que nous voyons, phénomène de projection (subjectif) responsable, entre autres, de l'illusion lunaire (lune perçue augmentée au voisinage de l'horizon). Cette méthode conduit à une hauteur subjective très élevée de la voûte du ciel aplati, de l'ordre de 1200 km, en supposant que cette voûte est de forme sphérique. Il existe par ailleurs au moins deux autres méthodes, qui ne sont pas citées dans l'article, pour déterminer la hauteur de l'atmosphère. Tout d'abord la mesure de la réfraction de la lumière des étoiles à sa traversée de l'atmosphère, méthode utilisée par Kepler au début du XVII^{ème} siècle pour déterminer la hauteur de l'atmosphère. La valeur de 3,6 km trouvée, incohérente avec celle déduite de la durée des crépuscules, a conduit Kepler à critiquer et rejeter la méthode des crépuscules. Une autre méthode, assez peu précise, consiste à estimer la grandeur de la projection de la terre sur la lune durant les éclipses de lune, l'image projetée étant trouvée légèrement plus grande que ne l'est la projection de la terre si elle était dénuée d'atmosphère. Cet excès, si on l'attribue à l'ombre projetée par l'atmosphère, conduit, à partir des mesures effectuées par Le Gentil au milieu du XVIII^{ème} siècle, à une hauteur de l'atmosphère de l'ordre de 110 km (La Lande, 1771).

Avant de remettre en perspective les estimations de la hauteur de l'atmosphère faites par ces différentes méthodes, ainsi qu'elles sont apparues dans les chapitres précédents consacrés aux matières subtiles, nous devons détailler deux questions essentielles, à savoir celle du taux de chargement en impuretés de l'air des basses couches, caractéristique de l'air grossier, et l'extension verticale inconnue de l'air pur, voire de l'air subtil, vers le haut.

3. Deux grands paradigmes relatifs à la composition et l'extension verticale de l'atmosphère au XVIII^{ème} siècle

3.1 Une atmosphère inférieure lourdement chargée en vapeurs et exhalaisons

Les études menées à la fin du XVII^{ème} siècle et au XVIII^{ème} siècle touchant à la hauteur de l'atmosphère doivent être replacées dans la vision, largement partagée à l'Académie des Sciences à l'époque, d'un air des basses couches lourdement chargé en vapeurs et exhalaisons terrestres. Christoph Rothmann, à la fin du XVI^{ème} siècle, cherchant à concilier la pensée

stoïcienne de Jean Pena, pour qui il n'y a pas de frontière entre l'air que nous respirons et l'éther, qui sont de même nature, et la mise en évidence par Tycho Brahé de la réfraction atmosphérique, invoque la présence de vapeurs « *toujours présentes près de l'horizon* ». Cette idée rejoint celle d'Aristote et des penseurs du Moyen-Âge expliquant par la présence de vapeurs, ou de nuages, l'agrandissement apparent de la lune quand elle est proche de l'horizon. Tycho Brahé, débattant avec Rothmann, s'oppose à l'idée d'un ciel aérien d'une nature unique, tel que le conçoit Pena, mais accepte la possibilité d'une transition continue entre l'air d'en bas, celui que nous respirons, et l'air pur d'en haut. Cette transition, qu'elle soit abrupte ou progressive, constitue le principe du modèle de réfraction de Kepler (qui la suppose abrupte), lui permettant de fournir la première estimation scientifique de la hauteur de l'atmosphère au début du XVII^{ème} siècle.

On trouve dans le *Dictionnaire géographique et critique* de Bruzen de la Martinière (1726) l'idée que « *l'atmosphère n'est autre chose que l'Æther, mêlé avec les vapeurs, & les exhalaisons de la Terre* ». L'éther dont il s'agit est dépourvu de toute pesanteur, ce qui explique que les météores (tels les globes de feu ou les étoiles filantes), formés dans l'atmosphère par des exhalaisons sulfureuses qui s'enflamment, étant plus légers que l'air, s'élèvent jusqu'au sommet de l'atmosphère, à la frontière de l'éther. De cette hétérogénéité de la masse de l'atmosphère, l'auteur de l'article conclut que l'air, « *diversement imprégné des parties sulfureuses, nitreuses, salines, etc.* », dépend de « *la qualité du pays, qui envoie les exhalaisons de différentes natures* », variant ainsi selon les lieux et les climats. Dans cette vision simple, que Kepler utilise pour son estimation de la hauteur de l'atmosphère, il n'y qu'une seule espèce d'air, un air grossier constitué d'un mélange entre l'éther et les exhalaisons terrestres.

Edme Mariotte, dans son essai *De la Nature de l'air* (1676), note que les vapeurs émanant de la Terre ne peuvent s'élever à une grande hauteur dans l'atmosphère pour deux raisons. D'une part, l'air y devient plus léger, et donc moins susceptible de les soutenir. D'autre part, le froid qui règne en altitude fait condenser les vapeurs et les rend donc plus pesantes, les faisant retomber en pluie. Il cite les expériences de mise sous vide d'air chargé de gouttelettes d'eau, lors desquelles cette eau tombe en pluie dans l'enceinte du fait que l'air raréfié n'est plus assez dense pour les soutenir. Il émet l'hypothèse qu'au-dessus de l'air des basses couches, une matière subtile, ou bien l'air lui-même fortement dilaté, s'étend jusqu'à une très grande distance de la Terre :

On pourrait douter si au-dessus de l'air il n'y a pas un vide parfait, ou une autre matière plus subtile, ou même si la dilatation de l'air ne va pas à une plus grande étendue que de 20 ou 30 lieues (96 ou 145 km), puisqu'il y a quelque vraisemblance qu'il doit s'étendre jusqu'à la lune. Mais en ce dernier cas, il faudrait croire que celui qui est fort élevé, a beaucoup moins de mouvement vers la terre a proportion de sa dilatation, que celui qui n'en est éloigné que d'une lieue ou de deux.

Ainsi, à partir de considérations physiques étayées par des expériences, comme celles menées dans les premières « machines du vide », et par l'observation météorologique, Mariotte est-il amené à inférer l'existence de deux sortes d'air, un air grossier au voisinage de la Terre, un air léger et pur, qui ne peut soutenir les impuretés du fait de sa ténuité, dans les couches hautes de l'atmosphère. Il émet l'hypothèse que l'air pur pourrait se prolonger jusqu'à la lune, donc de fait que l'espace planétaire ne soit pas occupé par l'éther, mais par un air très pur et très dilaté.

Musschenbroek, dans son *Essai de Physique* (1739), postule l'existence d'un air supérieur très élastique en raison de sa pureté, dont il ne précise pas s'il peut emplir l'espace planétaire, et d'un air inférieur moins élastique, du fait qu'il contient plus d'exhalaisons terrestres. Il émet l'hypothèse d'une possible différence de nature entre ces deux airs, et d'une séparation physique entre les deux milieux, celle-ci marquant la hauteur de l'air inférieur. En cela, il remplace la frontière entre l'air et l'éther par une frontière entre l'air inférieur et l'air supérieur. Il écrit :

Peut-être aussi que la force élastique de l'Air supérieur l'emporte sur celle de l'Air inférieur, que par conséquent ces deux sortes d'Air ne sont pas de même nature, qu'ils restent séparés l'un de l'autre, & qu'ils ne se mêlent pas ensemble, comme on voit l'Eau claire verte de Mer se séparer de l'Eau de Rivière, qui est trouble.

Il dérive cette idée des mesures de pression effectuées par Cassini sur diverses montagnes françaises lors de son expédition de 1700 destinée à prolonger le méridien de l'Observatoire de Paris. Celles-ci suggèrent que l'élasticité de l'air à haute altitude augmente plus vite que ne décroît le poids comprimant de l'atmosphère, contrairement à ce que prévoit la loi de Boyle-Mariotte, plus précisément semble croître à raison de l'inverse du carré de ce poids comprimant, voire davantage (Cassini, 1733). Outre l'accroissement de la force centrifuge et la décroissance de la force de pesanteur avec l'altitude, qui doivent jouer dans ce sens, Musschenbroek invoque la diminution avec l'altitude du contenu de l'atmosphère en vapeurs et exhalaisons, se traduisant par une augmentation de son degré de pureté, pour expliquer les observations de

Cassini. On retrouve cet argument fondamental exprimé à l'entrée ATMOSPHERE TERRESTRE du *Dictionnaire de physique* (1793) :

[...] d'où quelques physiciens ont conclu, que l'air qui est sur le sommet des montagnes, est d'une nature différente de l'air que nous respirons ici-bas, & suit apparemment d'autres lois dans sa dilatation & sa compression.

La raison de cette différence doit être attribuée à la quantité de vapeurs & d'exhalaisons grossières, dont l'air est chargé, & qui est bien plus considérable dans la partie inférieure de l'atmosphère qu'au-dessus. Ces vapeurs étant moins élastiques, & moins capables par conséquent de raréfaction que l'air pur, il faut nécessairement que les raréfactions de l'air pur augmentent en plus grande raison que le poids ne diminue.

L'abbé Nollet, dans ses *Leçons de physique expérimentale* (1745), note que, jusqu'à deux mille mètres d'altitude, les écarts d'altitude correspondant à des écarts de pression donnés demeurent quasiment constants, ne commençant à croître significativement, en vertu de la loi de Boyle-Mariotte, qu'au-dessus de ce niveau. Cela revient à dire que la pression décroît de manière quasi-linéaire jusqu'à 2000 m. Nollet attribue cette linéarité à « *la grande quantité de vapeurs grossières dont l'air est chargé dans cette basse région, & [au] grand poids qui le presse, rend[a]nt sa densité presque uniforme* ». Il relève qu'au-dessus de 2000 m, selon Cassini et Maraldi, « *l'air étant plus pur, son ressort est plus libre, & ses différents degrés de densités ne dépendent presque plus que de la pression des couches supérieures* ». Il note que « *plus ou moins de chaleur ou de pureté dans une région où nos observations ne peuvent s'étendre, suffit pour causer des changements assez considérables à la pesanteur de l'atmosphère, & à sa hauteur* », et remarque, comme Musschenbroek, que les variations avec l'altitude de la pesanteur et de la force centrifuge concourent aussi à étendre l'atmosphère vers le haut.

Cette idée selon laquelle il existe deux types d'air est très prégnante dans la littérature scientifique jusqu'à la fin du XVIII^{ème} siècle. Ainsi, on peut lire dans le *Dictionnaire de physique*, à l'entrée ATMOSPHERE TERRESTRE :

En supposant que l'air fût dans le principe des choses, un fluide simple enveloppant la terre, on n'a pu s'empêcher de convenir qu'il n'ait été bientôt mêlé & combiné avec un grand nombre de substances des trois règnes, & avec tous les fluides qui se trouvaient sur le globe terraque. En effet, la chaleur du soleil se communiquant à la terre, a dû produire dans tous les fluides une très grande évaporation de ces substances qui, alors ont été nécessairement mêlées avec la masse d'air environnant la terre ;

il en a été de même de toutes les matières évaporables, contenues dans les substances animales, végétales & minérales.

Jean-Henri Lambert (1774, 1781) fournit une estimation quantitative de la fraction d'exhalaisons (gouttelettes d'eau, particules de glace, particules salines) dans l'air grossier, à partir de la mesure de la vitesse du son dans l'air. Il reprend la théorie établie par Newton, qui a montré que la vitesse du son est égale à la vitesse acquise par une masse chutant dans le vide sur la moitié de la hauteur de l'atmosphère supposée homogène, hauteur estimée à 8 km par Mariotte (1676), puis Halley (1687). Cette vitesse est de l'ordre de 900 pieds par seconde, nettement inférieure à la vitesse mesurée, de l'ordre de 1040-1080 pieds par seconde. Lambert attribue cet écart (dû, comme nous le savons maintenant, à l'hypothèse faite par Newton d'isothermicité de l'air au passage de l'onde) à la présence de particules étrangères en suspension dans l'air, qui en augmentent la pesanteur et en diminuent l'élasticité, comprimant l'atmosphère vers le bas et réduisant en conséquence sa hauteur équivalente, donc la valeur de la vitesse du son estimée suivant la formule de Newton. Pour Lambert, ces particules en elles-mêmes ne sont pas susceptibles de modifier la vitesse du son, comme le montrent les mesures de vitesse du son faites en présence de brouillard, tout au plus peuvent-elles en atténuer l'intensité. Il fait, à partir d'un calcul estimant la correction de hauteur de l'atmosphère homogène requise, si l'on suppose les impuretés non présentes, pour obtenir la valeur mesurée de la vitesse du son, la déduction suivante :

Donc en supposant même que les particules étrangères n'occupent que les interstices de l'air pur, il s'ensuit que tout ce surplus du poids dérive de ces particules étrangères, & que par conséquent elles font la 12/37 partie ou environ le tiers de tout le poids d'un pied cube d'air pris à la surface de la mer.

Ainsi, l'atmosphère contiendrait jusqu'à 30% de son poids en exhalaisons de diverses natures au voisinage de la surface de la Terre, valeur tout-à-fait considérable qui montre à quel point cette composante de l'air était alors perçue comme jouant un rôle primordial dans l'équilibre général de l'atmosphère, étant notamment tenue pour principale responsable des variations diurnes, saisonnières et latitudinales de pression atmosphérique par les savants français de l'époque, au contraire des savants anglais, comme Halley, qui mettaient en avant le rôle des vents, ainsi que nous l'avons déjà mentionné (cf chap. 2).

A la toute fin du XVIII^{ème} siècle, Jean-André De Luc, dans ses Recherches sur les modifications de l'atmosphère (1784), reprend l'idée d'un air pur (éther condensé) et d'un air plus dense et plus réfractif, chargé d'exhalaisons, dans les basses couches :

Serait-il absurde de penser que l'air & l'éther sont une seule & même substance diversement modifiée ; que les Atmosphères des Planètes sont l'éther condensé autour d'elles par la gravitation, & que les différences de densité, de transparence & de vertu réfringente de ces Atmosphères, sont produites par celles des masses des Planètes, & par la nature & la quantité des vapeurs qui s'en élèvent ?

De Luc s'inscrit ainsi dans la continuité des spéculations de Mariotte un siècle plus tôt, en suggérant que la lune pourrait être entourée « d'une sphère d'un air pur, d'une enveloppe d'éther condensé, dans laquelle il ne s'élèverait point de vapeur ». Rappelons que l'éther, à cette époque, est défini comme un « fluide extrêmement subtil & élastique, qui est répandu dans tout l'Univers, qui remplit l'espace dans lequel les planètes se meuvent, qui pénètre & s'insinue avec facilité dans les corps les plus durs & les plus compacts » (cf entrée ÉTHER du *Dictionnaire de physique*). La densité de l'air, selon De Luc, diminuerait continument de la lune vers la Terre, puis se mettrait à croître en s'en approchant, en « devenant enfin assez dense pour être en équilibre avec les vapeurs & les exhalaisons qui s'élèvent de notre Globe, il serait alors notre Atmosphère proprement dit ». Il assimile ainsi l'air des hautes couches de l'atmosphère à un « éther condensé » autour de la Terre, un air subtil dont on verra qu'il est invoqué pour expliquer l'aurore boréale et la grande hauteur apparente de ses manifestations, air mélangé dans sa partie inférieure avec les vapeurs et exhalaisons terrestres.

3.2 Une atmosphère supérieure étendue vers le haut, mais jusqu'où ?

Le corollaire de l'existence d'une atmosphère grossière, lourdement chargée en exhalaisons dans les parties basses de l'atmosphère, est celui de la nécessaire existence d'un air pur dans les parties hautes, distinct ou non en nature de la matière subtile (l'éther) qui remplit l'espace planétaire. Les différentes définitions de l'atmosphère, telles qu'elles apparaissent à l'entrée ATMOSPHÈRE TERRESTRE du *Dictionnaire de physique* (extrait déjà cité), c'est-à-dire, soit seulement l'air grossier du bas, soit la totalité de l'air, incluant l'air pur du haut, exprime l'ambiguïté sur le statut de l'air pur, à savoir un air rattaché plutôt à l'atmosphère inférieure, ou bien un air plus proche dans sa nature de l'éther. Il est dit notamment que « l'espace qui est au-dessus de cet air grossier, quoiqu'il ne soit peut-être pas entièrement vide d'air, est supposé

rempli par une matière plus subtile qu'on appelle éther, & est appelé pour cette raison, région éthérée ou espace éthéré ». L'air du haut est donc explicitement assimilé à l'éther, considéré comme une matière « *plus subtile* » que l'air, sans plus, ce qui est une façon de ne pas aborder la question de la possible distinction entre éther et air subtil.

L'existence d'un air subtil, plus subtil que l'air grossier dont on mesure le poids par le baromètre, mais moins subtil que l'éther, a été postulé dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle, ainsi que nous l'avons précédemment développé (cf chap. 6). C'est la suspension du mercure à une hauteur presque trois fois supérieure à celle correspondant au poids de l'atmosphère mesuré par le baromètre, lorsqu'un tube rempli d'un mercure purgé de son air est retourné sur un récipient contenant du mercure, le mercure restant comme suspendu à l'extrémité fermée du tube, qui suggère à Huygens et Boyle l'existence d'un air subtil, traversant les pores du verre. Au tout début du XVIII^{ème} siècle, Amontons invoque une perméabilité du verre à un air différent de l'air grossier, plus subtil, pour expliquer les écarts entre les niveaux du mercure observés dans différents baromètres. Jean Bernoulli, à la même époque, explique la lumière du baromètre, encore appelée *phosphore mercuriel*, découverte par Jean-Félix Picard quelques décennies plus tôt et consistant en une lueur apparaissant dans un baromètre à mercure quand on le secoue, par un air subtil traversant le verre et interagissant par collision entre fluides avec l'éther contenu dans le mercure. Des expériences d'application de deux plaques de métal, ou de marbre, l'une contre l'autre, que l'on ne peut ensuite séparer qu'en exerçant une force considérable, bien plus importante que celle qui serait due au seul poids de l'atmosphère, tel que mesuré par le baromètre, vont dans le même sens, à savoir l'existence d'un air subtil pesant, mais traversant les pores du verre, qui néanmoins ne pourrait venir se loger dans les pores à la jonction des plaques du fait de leur petitesse. Cette dernière propriété est à rapprocher de l'explication de la cohésion des corps solides par la pression d'un air subtil totalement inélastique très étendu vers le haut, donc très pesant, qui maintiendrait ces corps ensemble, dont on trouve une théorie développée dans les *Essais de physique* de Claude Perrault (1680). Dans le même cadre, on lit à l'entrée ÉTHER du *Dictionnaire de physique* mention du fait que Malebranche et Jacques Bernoulli « *attribuent la solidité des corps & leur adhérence à une pression de la matière éthérée* », ce qui exprime la même idée, mais avec la nuance que c'est l'éther lui-même, et non l'air pur, qui joue le rôle actif.

La question de l'extension verticale de l'atmosphère est intimement liée à celle de l'existence d'une limite à l'élasticité de l'air. L'entrée AIR du *Dictionnaire de physique* aborde dans le

détail la question de la compressibilité et de l'extensibilité de l'air. Lorsqu'on comprime l'air, par exemple quatre fois, on a observé expérimentalement que la loi des dilatations, ou de Boyle-Mariotte, n'est pas exactement suivie (ce qui est effectivement le cas du fait que l'air comprimé n'est pas exactement un gaz parfait). Les expériences de compression montrent qu'on peut atteindre des facteurs de 13 (Boyle), 38 (Hales), voire près de 2000 en faisant geler de l'eau surmontée d'une couche d'air dans une capsule de fer (Hales). Pour les savants du XVIII^{ème} siècle, l'élasticité de l'air réside dans la figure de ses particules, qu'on assimile alors à des flocons, ou à de petits cerceaux. Il suit naturellement, selon certains d'entre eux, qu'à l'ultime limite de compression, quand toutes les parties se touchent, la loi des dilatations cesse d'être opérante, et l'air perd toute compressibilité. Halley pense qu'on ne peut comprimer l'air de plus d'un facteur 800, au-delà duquel l'air comprimé deviendrait plus pesant que l'eau, opinion à laquelle s'oppose Amontons, qui, lui, considère qu'il n'existe pas de limite au taux de compression de l'air :

M. Amontons combattant le sentiment de M. Halley, soutient dans les mémoires de l'académie royale des sciences, qu'on ne peut point assigner de bornes précises à la condensation de l'air ; que plus on le chargera, plus on le condensera ; qu'il n'est élastique qu'en vertu du feu qu'il contient ; & que comme il est impossible d'en tirer tout le feu qui y est, il est également impossible de le condenser à un point au-delà duquel on ne puisse plus aller.

On lit à l'entrée RARÉFACTION du *Dictionnaire de physique*, concernant les causes à l'origine de la compression ou de la dilatation des gaz :

Deux causes contribuent à augmenter ou diminuer le volume des corps, sans augmenter ou diminuer leur matière propre : le calorique & la compression. En augmentant la température des corps & en diminuant le rapprochement des particules, on augmente leur volume ; en diminuant leur température & augmentant leur pression, on diminue leur volume.

[...]

Dans les gaz , les molécules n'obéissent qu'à deux forces ; le calorique qui les écarte, & la pression de l'air qui les rapproche.

Amontons a précisément expérimenté l'effet de la chaleur sur l'élasticité de l'air, et montré que « l'air rendu aussi chaud que l'eau bouillante, acquérait une force qui est au poids de l'atmosphère, comme 10 à 33, ou même comme 10 à 35 ». Il reste, selon lui, toujours suffisamment de chaleur dans un volume d'air comprimé pour qu'il conserve son élasticité, et puisse être comprimé davantage.

On sait peu de chose de l'existence, ou non, d'une limite à la raréfaction de l'air. Musschenbroek, sur la base d'expériences « grossières », dit qu'on a pu dilater l'air d'un facteur 4000, ce qui correspond, d'après les modèles de répartition verticale de l'atmosphère, à une altitude de l'ordre de 60 km (Mariotte, 1676). Boyle assure avoir réussi à dilater l'air, par pure expansion (donc sans le chauffer), d'un facteur proche de 14000 (correspondant à une altitude de l'ordre de 70 km, voisine de celle déduite de la durée des crépuscules). On imagine qu'il doit exister une limite à la raréfaction de l'air :

Il n'est pas moins évident que l'air ne saurait se raréfier à l'infini, & que sa raréfaction a des bornes ; d'où il s'ensuit que la règle des raréfactions en raison inverse des poids comprimants, n'est pas non plus entièrement exacte ; car il faudrait, suivant cette règle, qu'à un degré quelconque de raréfaction de l'air, on trouvât un poids correspondant qui empêcherait cette raréfaction d'être plus grande. Or, lorsque l'air est raréfié le plus qu'il est possible, il n'est alors chargé d'aucun poids, & il occupe cependant un certain espace.

On retrouve chez Nollet (1745) l'idée que l'atmosphère peut s'étendre jusqu'à une hauteur plus grande que celle qui est donnée par la loi des dilatations en appliquant à toutes les hauteurs la loi de Boyle-Mariotte :

Un corps à ressort que l'on a comprimé fortement avec un certain nombre de poids égaux, lorsqu'on vient à le décharger peu à peu, se déploie par des quantités qui vont toujours en augmentant, & qui suivent d'abord une progression assez régulière ; mais sur la fin, lorsqu'on ôte les derniers poids, le développement ou l'extension du ressort se fait, dans des rapports beaucoup plus considérables. Comme l'air est un fluide élastique, on doit présumer que dans les hautes régions, où il est bien moins chargé par son propre poids, que partout ailleurs où nous pouvons faire des épreuves, il s'étend aussi beaucoup davantage, ce qui doit donner à l'atmosphère une hauteur plus grande qu'elle n'aurait, si nous en devions juger par les quantités qui répondent ici-bas à une ligne d'abaissement du mercure dans le baromètre.

Cette hauteur plus grande est néanmoins finie, estimée par Nollet être de l'ordre de 60 ou 80 km.

La communauté scientifique du XVIII^{ème} siècle est divisée sur la question, ou non, de l'infinité de l'atmosphère. On trouve par exemple à l'entrée BAROMÈTRE de l'*Encyclopédie de Diderot*

et d'Alembert une addition du Père Grégoire Fontana dans laquelle est souligné le caractère selon lui absurde de l'infinité de l'atmosphère déduite de la loi des dilatations. Fontana écrit :

Il s'ensuit que la hauteur de l'atmosphère est infinie, ce qui est une conséquence absurde, qui coule de l'hypothèse, que les densités sont proportionnelles aux pressions : hypothèse qui s'approche de la vérité, mais qui n'est pas exactement ni géométriquement vraie, comme le savent tous les Physiciens. Pour faire disparaître cette absurdité & fermer la bouche à quelque Pyrrhonien qui pourrait se moquer des Mathématiques appliquées à la Physique, il suffit de supposer que les densités de l'air de l'atmosphère sont proportionnelles aux pressions, ou aux poids qui sont par-dessus, & à un poids toujours égal & constant C ; & alors l'absurdité qui suit de l'atmosphère infinie disparaîtra.

Daniel Bernoulli émet une opinion plus nuancée. Dans son Hydrodynamique (1738), il suggère que l'élasticité d'un fluide est liée au mouvement rapide dans toutes les directions des particules qui le composent. Il imagine, dans une approche préfigurant la théorie cinétique des gaz, un cylindre creux contenant un gaz, et un diaphragme verticalement mobile surmontant ce gaz et chargé d'un certain poids. Il fait l'hypothèse que le diaphragme, maintenu en l'air par la pression du gaz, est soutenu par les chocs des particules du gaz sous-jacent. Bernoulli prouve par un calcul que, dans ce cas, le volume occupé est en raison inverse du poids qui le charge (si la compressibilité du fluide est infinie), retrouvant la loi de Boyle-Mariotte. Il prévoit par le calcul que la force élastique du gaz est en raison doublée de l'augmentation de vitesse des particules provoquée par une élévation de température, autrement dit que la température se mesure à la valeur du carré de la vitesse d'agitation des particules. La force élastique est également proportionnelle à la densité du gaz. Considérant l'atmosphère, et la question de son étendue verticale, Bernoulli énonce la proposition suivante, dans laquelle il ne se prononce pas sur le caractère fini ou infini de l'atmosphère :

Si la hauteur de l'Atmosphère est finie, dit-il, c'est parce que les particules perdent leur mouvement lorsqu'elles arrivent dans le haut des colonnes, où elles forment alors un fluide simplement grave, privé de toute élasticité. Dans ce cas il paraît : 1°. que les colonnes s'élèveront également, à cause des communications latérales dans toute leur hauteur. 2°. Que la densité des couches supérieures sera partout la même, parce qu'elles ont la même hauteur & qu'elles sont en équilibre ; en sorte que les pressions seront à toutes les hauteurs, proportionnelles au poids de la couche supérieure qui sera le même partout. Et si l'élasticité ou le mouvement des parties n'a point de borne, & que par conséquent la hauteur des colonnes soit indéfinie, il suffira, pour produire le même effet, de supposer que les dernières couches sensibles de l'atmosphère sont partout chargées d'un poids égal.

Ainsi, Bernoulli exprime-t-il, comme les opposants à l'idée d'une expansibilité infinie de l'air, le principe d'une couche supérieure inélastique pesant sur l'atmosphère, seule façon de la borner vers le haut par application de la loi des dilatations, tout en se ménageant la possibilité que l'élasticité n'ait pas de borne et donc que la hauteur des colonnes soit indéfinie, en supposant dans ce cas les dernières couches sensibles chargées d'un poids égal (celui de ces colonnes indéfinies les surmontant).

Pour Lamarck (1776), l'air n'est dans son état naturel, air parfaitement pur, qu'à la surface de l'atmosphère, et il se comprime vers le bas du fait du poids croissant de l'atmosphère qui se trouve au-dessus :

L'air entoure notre globe jusqu'à une certaine hauteur, et constitue ce qu'on nomme l'atmosphère. Cette atmosphère à sa superficie, comme la mer a la sienne ; et il paraît qu'elle est susceptible d'une mobilité infiniment plus grande que celle qu'offre la mer la plus agitée. Ce n'est qu'à la superficie (ou la surface supérieure) de l'atmosphère, que l'air est véritablement dans son état naturel ; qu'il y jouit de la rareté qui lui est propre, c'est-à-dire, qu'il n'est ni condensé ni raréfié ; et c'est sans doute là seulement qu'il est parfaitement pur : mais à un pied au-dessous de cette superficie, ce fluide élastique est un peu comprimé par le poids de la portion d'air qu'il soutient, et par conséquent il est en cet endroit un peu plus dense qu'à la superficie de l'atmosphère. On conçoit de-là que cette densité va en croissant jusqu'à la surface de la terre, parce qu'en effet l'air est d'autant plus comprimé qu'il est plus inférieur, c'est-à-dire, plus éloigné de la surface supérieure de l'atmosphère.

Lamarck ne se prononce pas explicitement sur l'extension verticale de l'air pur, mais sa conception semble rejoindre celle, par exemple, de De Luc qui voit dans l'atmosphère un « éther condensé » autour de la planète. Lamarck postule que cet air présent à la limite supérieure de l'atmosphère est un air naturel, ce que l'on peut interpréter comme le fait qu'il provient d'un éther plus étendu, indépendant de la planète, qu'elle condense autour d'elle en le comprimant de par sa force de gravité.

La discussion, de nature essentiellement philosophique et spéculative, sur l'existence, ou non, d'une atmosphère supérieure d'air pur, matière subtile plus pure que l'air, ou éther, s'étendant éventuellement jusqu'à l'espace planétaire, n'interfère néanmoins qu'assez peu avec celle de la hauteur de l'atmosphère, si par atmosphère nous entendons « l'atmosphère sensible », celle qui se manifeste physiquement à nous par ses effets sur la lumière (réfraction, réflexion, etc). Il faut

noter dans la littérature de la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle et du XVIII^{ème} siècle la déconnexion entre cette question de l'air subtil, éventuellement très étendu, et celle de la hauteur de l'atmosphère, au sens donc d'atmosphère sensible, dont on voit dès le début du XVII^{ème} siècle que l'écart entre les hauteurs déduites de la mesure de la réfraction atmosphérique par Kepler et de la durée des crépuscules est source de contradictions, de débats et d'avancées conceptuelles. La méthode scientifique consistant à comparer les résultats de l'observation avec des modèles, ou des représentations, de l'atmosphère, alors naissante, se distancie des considérations qualitatives, non vérifiables par l'expérience, quant à l'air subtil et à l'éther. L'atmosphère, au sens d'objet physique, devient l'atmosphère sensible, qui nous est accessible par l'observation et l'expérience, et c'est à estimer la hauteur de cette atmosphère sensible que s'emploient les savants de l'époque, développant méthodes d'observation et de calcul pour confronter la réalité et les modèles élaborés pour la représenter. Notons cependant l'importance de l'air subtil dans le système de l'aurore boréale proposé par Mairan, air subtil rendu nécessaire par la très grande hauteur du phénomène.

Nous allons maintenant passer en revue les principales incohérences entre les estimations faites suivant différentes méthodes de la hauteur de l'atmosphère, déjà partiellement présentées dans les chapitres relatifs aux matières subtiles, en en établissant une synthèse, parfois enrichie de faits ou de considérations nouvelles.

4. Les trois principales incohérences entre les estimations faites par des méthodes différentes de la hauteur de l'atmosphère

4.1 Première incohérence : durée des crépuscules et réfraction atmosphérique

Le désaccord entre la hauteur de l'atmosphère estimée à partir de la durée des crépuscules par Ibn Mu'adh au XI^{ème} siècle, soit 80 km, et celle déduite par Kepler au début du XVII^{ème} siècle de la mesure de l'effet de la réfraction atmosphérique sur la position apparente des étoiles, soit 3,6 km, désaccord dont nous avons précédemment détaillé les modalités (cf chap. 2), est le fait scientifique majeur sur lequel va se construire la représentation de l'atmosphère dans la première moitié du XVII^{ème} siècle. Le terme même d'atmosphère a été forgé à la fin du XVI^{ème} siècle pour représenter cette région, d'épaisseur 80 km, de l'air grossier, constitué d'un mélange d'air pur et d'exhalaisons terrestres, dont les couches supérieures ultimes réfléchissent la

lumière du soleil avant et après son coucher. En effet, l'air pur, par nature léger et transparent, n'est pas considéré à cette époque comme susceptible de réfléchir la lumière. L'atmosphère est ainsi un objet de nature mathématique, siège de phénomènes optiques tels que la réflexion et la réfraction de la lumière, que les physiciens caractérisent à partir des manifestations lumineuses dont il est le siège. La représentation de l'atmosphère utilisée par Kepler, à savoir un milieu homogène séparé par une frontière physique, supposée être représentée par le sommet de la plus haute couche vue en réflexion durant les crépuscules, d'un éther consistant en un air très pur, l'amène à rechercher une cohérence entre la hauteur de cette frontière et celle déduite des mesures de réfraction. Kepler ne trouve pas cette cohérence et cherche à l'expliquer en argumentant contre l'estimation faite à partir de la durée des crépuscules. La très grande hauteur déduite des crépuscules est critiquée à cette époque au prétexte que le sommet des nuages est fréquemment au-dessous des pics montagneux, ce qui place la limite beaucoup plus bas. Kepler, se rangeant à cet avis, et probablement aussi du fait qu'il est astronome et accorde plus de poids à l'observation des étoiles, privilégie la valeur de 3,6 km déduite de ses mesures de réfraction, et propose plusieurs explications du désaccord constaté.

Une première explication proposée par Kepler tient à l'effet de la réfraction atmosphérique, qui courbe les rayons, réduisant la hauteur requise de l'atmosphère, et doit être prise en compte pour calculer la hauteur de l'atmosphère à partir de la durée du crépuscule. La Hire, dans un traité de 1713, calcule la correction à apporter qui, cumulée avec la prise en compte de l'extension angulaire non nulle du soleil, se traduit par une réduction de l'angle limite de 18° , valeur de l'angle sous l'horizon au-delà duquel la nuit devient parfaitement noire, de près de 1° , et abaisse, en tenant compte de la réduction de l'angle limite et de la courbure des rayons par la réfraction, de 80 km à 70 km la hauteur, estimée par cette méthode, de l'atmosphère.

La deuxième explication avancée par Kepler vient d'une observation directe du soleil, alors que celui-ci devrait se trouver très au-dessous de l'horizon, relatée par Willem Barents lors d'une expédition dédiée à la recherche d'une voie maritime septentrionale vers la Chine à la toute fin du XVI^{ème} siècle. Kepler explique ce phénomène par une succession de réfractions et de réflexions de la lumière du soleil dans l'épaisseur de l'atmosphère, assimilée à un miroir, suivant un principe qui rappelle celui des mirages. Si l'on suppose que la lumière du soleil est susceptible de subir plus d'une réflexion dans l'atmosphère, la hauteur de l'atmosphère requise pour expliquer la durée des crépuscules est moindre que celle estimée par les savants arabes en supposant une réflexion unique. Le calcul de la hauteur corrigée n'est pas fait par Kepler, mais

par Lambert, plus d'un siècle plus tard, dans son *Photometria* (1760). Biot détaille et reprend les calculs de Lambert dans son *Traité élémentaire d'Astronomie Physique* (1841). Un deuxième crépuscule, pour lequel la source de lumière n'est pas directement le soleil, mais le cône de lumière du soleil illuminant l'atmosphère, celui-ci se trouvant plus bas que l'angle de 18° sous l'horizon auquel se termine le premier crépuscule, est considéré. Ce deuxième cercle crépusculaire résulte de l'éclairement produit par la lumière solaire ayant subi deux réflexions dans l'atmosphère. Il cite, à l'appui de l'existence de ce deuxième cercle, des observations faites en mer ou sur des montagnes, comme par exemple celle-ci, extraite du cours de météorologie de Kaemtz (1858) :

Peu de temps après le coucher du soleil, les cimes neigeuses des Alpes paraissent colorées en rose; cette coloration devient ensuite moins vive et disparaît enfin lorsque l'ombre de la terre s'étend sur les sommités : alors les neiges prennent un aspect d'un gris bleuâtre. Quelquefois les Alpes se colorent de nouveau, mais d'une manière moins marquée et moins longtemps que la première fois. Ce phénomène est surtout remarquable lorsque des cumulus ou des cirrocumulus légers flottent dans l'ouest, les escarpements nus des rochers ressemblent alors à des masses de fer incandescentes. Ici encore les rayons rouges réfléchis arrivent à l'œil en plus grand nombre, et cette seconde coloration en rose vient certainement de ce que les rayons rouges réfléchis par l'atmosphère éclairent pour la seconde fois les sommets des montagnes.

Lambert considère également un troisième cercle crépusculaire, correspondant à la lumière ayant subi trois réflexions. Reprenant les formules de Lambert, Biot, qui tient également compte de la réfraction, trouve des hauteurs de l'atmosphère de 59 km dans l'hypothèse d'une seule réflexion (qui correspond au calcul canonique réalisé par les savants arabes, cette valeur étant cependant nettement inférieure à la valeur de 70 km trouvée par La Hire en incluant l'effet de la réfraction), 10,8 km pour deux réflexions, et 6,4 km pour trois réflexions. Écartant la dernière valeur, jugée trop faible, il en déduit pour l'atmosphère une hauteur comprise entre 10,8 et 59 km. Il cite par ailleurs des observations faites par Lambert à Augsburg en 1759, au cours desquelles celui-ci dit être parvenu à séparer les lumières des premier et deuxième crépuscules, et estimer la hauteur de l'ultime couche réfléchissante à 29 km, valeur intermédiaire entre les valeurs calculées pour une, et pour deux réflexions. L'idée de Kepler, suivant laquelle la réflexion multiple peut expliquer le désaccord entre son estimation de la hauteur de l'atmosphère et celle déduite des crépuscules, apparaît donc physiquement fondée, et l'on est frappé de constater que près de deux siècles après Kepler, Biot accorde à ces calculs une

légitimité pour estimer la hauteur de l'atmosphère, qui pourrait être selon lui aussi faible qu'une dizaine de kilomètres.

La troisième explication proposée par Kepler est l'existence d'une atmosphère solaire lumineuse, agrandissant le disque lumineux du soleil et réduisant en conséquence la hauteur requise de l'atmosphère. Cette hypothèse a été détaillée dans le chapitre consacré à la matière solaire (cf chap. 3). La Hire (1713) démontre la confusion faite par Kepler entre le premier cercle crépusculaire et une potentielle atmosphère solaire s'élevant au-dessus de la surface du soleil. Néanmoins, l'occurrence de plusieurs éclipses totales de soleil au début du XVIII^{ème} siècle, faisant apparaître une couronne lumineuse étendue autour du soleil pendant l'occultation du disque solaire, ranime l'intérêt pour l'atmosphère solaire, et la lumière zodiacale, découverte par Cassini à la fin du XVII^{ème} siècle, dont on pense à l'époque qu'elle en constitue l'extension à grande distance. La Hire s'oppose à l'assimilation de la couronne lumineuse vue pendant les éclipses à l'atmosphère solaire, attribuant cette couronne à un éparpillement de la lumière solaire réfléchi par les irrégularités de la surface lunaire.

Ainsi, malgré les tentatives pour rapprocher les deux valeurs, celle déduite de la durée des crépuscules reste significativement plus élevée (typiquement, et au minimum, une trentaine de kilomètres), même si la réfraction et la réflexion multiple sont susceptibles de diminuer quelque peu la valeur historique déterminée par Ibn Mu'adh. Concernant la réfraction, l'hypothèse de l'existence d'une matière réfractive subtile, ainsi que nous allons le montrer, est utilisée par les savants français pour lever l'incohérence.

4.2 Deuxième incohérence : réfraction atmosphérique et pression de l'air

On a vu (cf chap. 2) que la mise en évidence par Torricelli du caractère pesant de l'atmosphère, au milieu du XVII^{ème} siècle, et l'expérience du Puy-de-Dôme suggérée par Pascal et Descartes, et réalisée par Périer, montrant que le poids de l'atmosphère diminue avec l'altitude, modifient considérablement la nature de l'objet « atmosphère », jusqu'alors considéré par les savants comme un milieu essentiellement abstrait, siège de réfraction et de réflexion de la lumière donnant lieu à des calculs mathématiques (modèle de crépuscule de Ibn Mu'adh, modèle de réfraction de Kepler). L'air prend avec la découverte de Torricelli le statut de matière physique, pesante et compressible, qui, par dilatations successives, se raréfie lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère. Gassendi développe aussitôt une théorie atomiste de l'air, imaginant que

l'atmosphère est composée de corpuscules, dont la plupart sont des exhalaisons de nature terrestre, qui ont un poids et tendent à retomber vers la terre, créant la montée du mercure dans le tube, théorie rapidement popularisée outre-Manche. Très vite, Mariotte côté français, et Boyle côté anglais, établissent la loi des dilatations, qui exprime que la force élastique de l'air (c'est-à-dire sa pression) varie en raison inverse de son volume, loi dite de Boyle-Mariotte. A partir du rapport, de plus en plus précisément connu, entre la densité du mercure et celle de l'air, les physiciens calculent la hauteur de la colonne d'air, supposée homogène, nécessaire pour équilibrer les 760 mm de mercure mesurés dans le baromètre. Mariotte, dans son essai *De la nature de l'air* (1676), propose pour la hauteur de l'atmosphère homogène une valeur de 2 lieues, soit 8 km. Divisant l'atmosphère, supposée homogène, en 336 couches, il calcule de proche en proche, à partir du bas, les dilatations des couches successives du fait de la diminution du poids de l'air qui les comprime, et conclut à une atmosphère de 60 km d'altitude, le degré de raréfaction au sommet étant de 4032. Si l'on accepte que l'air puisse être raréfié 8 millions de fois, l'atmosphère s'élève selon lui à 120 km. Il teste son modèle sur les mesures de pression effectuées par Cassini sur une montagne de Provence (donc à relativement basse altitude), et le trouve vérifié par l'observation à mieux que 2%. Outre-Manche, Hooke, dans ses *Micrographia* (1667), suggère, à partir d'un calcul analogue, que seules les couches situées dans la partie basse de l'atmosphère, typiquement les 5 à 7 premiers kilomètres, infléchissent significativement les rayons lumineux du soleil par réfraction. Cette constatation semble devoir réconcilier la faible valeur de la hauteur de l'atmosphère proposée par Kepler, puis Cassini dans sa table des réfractions publiée en 1662, s'accordant bien avec l'estimation par Hooke d'une hauteur de la couche réfractive de quelques kilomètres, avec la hauteur plus importante déduite de la durée des crépuscules. Halley (1687) calcule que l'air à 65 km d'altitude, au voisinage de la hauteur fournie par la durée du crépuscule, est raréfié d'un facteur 4000, retrouvant à très peu près les résultats de Mariotte.

Nonobstant la conclusion de Hooke réconciliant la finesse de l'atmosphère réfractive avec l'épaisseur de l'atmosphère déduite de la durée des crépuscules, les savants français de l'Académie des Sciences, alors dominée par les cartésiens, relèvent plusieurs contradictions qu'ils tentent de résoudre en introduisant une matière réfractive spécifique (cf chap. 2). Nous y détaillons la représentation de Hartsoeker, pour qui, suivant la doctrine cartésienne, les rayons de lumière traversent plus librement un milieu dur et structuré (les particules en suspension dans l'atmosphère) qu'un milieu mou et désorganisé (l'air). Ainsi, la réfraction de la lumière des étoiles ne se fait pas, selon Hartsoeker, à l'interface entre l'éther et l'air, mais à celle qui

sépare l'air du haut, « *sans vapeurs & sans exhalaisons* », de l'air du bas qui en est chargé. Il explique le surcroît de réfraction horizontale observé en hiver, ou en régions polaires, par la présence de couches stables d'exhalaisons se tenant plus près de la surface qu'aux températures estivales. Fontenelle adhère à cette vision, mais note son inconsistance avec certaines observations. Par exemple, l'horizon de la mer, observé à Marseille par Laval, apparaît plus bas, indiquant donc une réfraction moindre, quand « *la mer a été grosse* » et que l'air est « *rempli à l'horizon d'une brume déliée* ». La réfraction d'un astre devrait être plus grande quand il est vu à travers un nuage, ce que Cassini n'observe pas. « *De là M. Cassini conjecture qu'il pourrait y avoir dans l'air une matière réfractive différente de l'air* ». Ainsi, l'absence constatée de rôle des exhalaisons dans la réfraction d'après les observations, rôle supposé majeur sur la base de l'héritage aristotélicien et des théories physiques de la réfraction atmosphérique alors en usage, incite les savants français de l'époque à postuler l'existence d'une matière subtile responsable de la réfraction. Cette conclusion est corroborée par l'observation de réfractions horizontales doubles en Laponie, alors même que le baromètre y indique une pression similaire à celle observée sous nos latitudes, ce qui fait conclure à La Hire « *que la partie de l'air qui cause les Réfractions, n'a point de rapport avec celle qui fait sa pesanteur* », et donc que la matière responsable de la réfraction ne pèse pas sur le mercure du baromètre (du fait qu'elle est subtile et traverse les pores du verre). L'effet de la température de l'air sur la réfraction horizontale, parfaitement compris dès cette époque par Newton, ne l'est pas par les cartésiens, pour qui la composante de vapeurs et d'exhalaisons est pour l'essentiel responsable des variations de poids de l'atmosphère mesurées dans le baromètre. Un autre argument en faveur de la matière réfractive réside dans le fait que la loi de décroissance avec l'altitude de la densité donnée par application de la loi de Boyle-Mariotte conduit à une valeur calculée de la réfraction horizontale plus forte que celle observée, une décroissance linéaire (plutôt qu'exponentielle) avec l'altitude de cette densité, permettant une estimation plus conforme à la réalité. Ce fait, dû à l'absence de prise en compte de la décroissance de la température avec l'altitude, ainsi que Simpson l'exprime clairement en 1743, fait soupçonner aux savants français l'existence d'une matière réfractive n'obéissant pas à la loi de Boyle-Mariotte.

Une dernière raison, majeure, invoquée pour postuler l'existence d'une matière réfractive spécifique différente de l'air est l'inconsistance entre la hauteur de l'atmosphère réfractive, 3,6 km selon Kepler, puis Jean-Dominique Cassini, valeur portée au début du XVIII^{ème} siècle à 14 km par Jacques Cassini en utilisant un modèle de décroissance linéaire de la densité avec

l'altitude, les rayons lumineux suivant des trajectoires progressivement incurvées par la réfraction (au lieu de n'être brisé qu'une fois, et se propager en ligne droite dans l'atmosphère), et celle déduite des mesures de pression réalisées par Maraldi sur les montagnes, de l'ordre de 30 km, ou encore celle inférée à partir de la durée des crépuscules (70 km). Pour Fontenelle (1714), « *l'atmosphère ne serait donc réfractive que dans une petite partie de son étendue, & dans ses couches les plus basses, ou, si l'on veut, la matière réfractive serait différente de l'atmosphère* ». Cette proposition surprend puisque Hooke, cinquante ans plus tôt, avait correctement conclu que l'atmosphère n'infléchissait significativement les rayons lumineux par réfraction que dans les cinq ou sept premiers kilomètres au-dessus de la surface, là où l'air est le plus dense. Il faut noter cependant quelques réserves quant à la réalité de la matière réfractive. Ainsi, Maraldi écrit-il en 1703, à propos d'observations « *faites tant au bord de la mer, que sur les plus hautes montagnes* », qu'elles « *serviraient à connaître si cette matière réfractive différente de celle de l'air, est, en effet dans la nature, au lieu que jusqu'à présent il [Cassini] ne la propose que pour une invention commode pour le calcul des réfractions* ». Et en effet, l'existence d'une matière réfractive différente de l'air, donc non assujettie aux lois qui régissent son comportement, est mise à profit par des théoriciens tels que Bouguer (1729) pour paramétriser en loi de puissance la variation de la dilatation de cette matière en fonction de la distance au centre de la planète, et proposer des solutions analytiques de l'équation différentielle régissant la trajectoire d'un rayon lumineux au sein de cette matière.

L'hypothèse de la matière réfractive, conçue pour intégrer certains faits observationnels contredisant le rôle majeur des exhalaisons dans la réfraction, est faite par les savants français dès le début du XVIII^{ème} siècle, ceci en dépit de la mise en cohérence opérée par Hooke. Halley, à la fin du XVII^{ème} siècle, propose une solution à l'incohérence entre la hauteur déduite de la durée du crépuscule et celle dérivée de la pression de l'air, en montrant qu'une dilatation d'un facteur 4000, correspondant à une hauteur de 65 km, et qui peut être atteinte dans les machines du vide, ainsi que l'a montré Boyle, réconcilie les résultats des méthodes par les crépuscules et par la pression de l'air. Newton comprend que les incohérences apparentes entre la loi des dilatations et la réfraction horizontale provient d'un effet de température, qui n'est pas correctement pris en compte. Les savants anglais réconcilient donc en un tout cohérent, dès la fin du XVII^{ème} siècle, les estimations de la hauteur par les trois méthodes de la pression de l'air, des crépuscules, et de la réfraction atmosphérique. Les savants français, concentrés sur l'idée d'un chargement de l'atmosphère en vapeurs et exhalaisons très important (pouvant représenter jusqu'au tiers de sa masse), s'égarèrent quelque peu dans leurs interprétations des

variations du baromètre, qu'ils attribuent aux impuretés, et se heurtent au fait observationnel contradictoire que ces impuretés, supposées responsables de la réfraction (dans la tradition aristotélicienne), ne jouent pas le rôle qu'on leur prête d'après les observations faites. De ce hiatus naît l'idée d'une matière réfractive subtile, distincte de l'air grossier, concentrée dans les premiers kilomètres de l'atmosphère, idée que ne sera définitivement abandonnée qu'un siècle plus tard suite à la modélisation exacte (intégrant les effets de température), corroborée par l'observation, de la réfraction atmosphérique par Pierre-Simon de Laplace.

4.3 Troisième incohérence : pression de l'air et aurores boréales

La reprise des aurores boréales au début du XVIII^{ème} siècle, après une période de faible activité solaire qui s'étend sur une grande partie du XVII^{ème} siècle (le « petit âge glaciaire »), suscite un très fort intérêt parmi les scientifiques. En l'espace de trente ans, trois grandes théories différentes sont proposées pour les expliquer. La première, élaborée par Edmond Halley en 1717, invoque la circulation de la matière magnétique à travers le globe terrestre et autour de lui, suivant la théorie cartésienne de l'aimant (cf chap. 4). La deuxième, proposée par Jean-Jacques Dortous de Mairan en 1733, suppose la précipitation épisodique dans l'atmosphère terrestre de la matière solaire, celle-ci se mêlant à l'air subtil des hautes couches (cf chap. 3 & 6). La troisième, due à Leonhard Euler et publiée en 1746, fait appel à la pression exercée par les rayons du soleil, qui chasserait les parties les plus subtiles de l'air à grande distance de la terre, à la façon dont la matière cométaire repoussée par le soleil forme une queue dans la direction opposée au soleil.

Le débat autour de ces théories concurrentes est vif. Elles n'ont pas du tout les mêmes implications en termes de hauteur de l'atmosphère. Dans la théorie magnétique, le faisceau de particules magnétiques traversant la terre du pôle sud au pôle nord magnétique émerge, selon Halley, dans l'éther, pas nécessairement dans l'atmosphère. Dans le système cartésien, le tourbillon magnétique se referme à cause des particules du deuxième élément constituant l'atmosphère qui freinent les particules magnétiques, ce qui implique que le flux de matière magnétique soit dans l'atmosphère, mais Halley n'est pas cartésien, et ne mentionne pas explicitement que l'aurore se produit dans l'atmosphère. Elle est cependant liée à la Terre, dans laquelle le tourbillon magnétique terrestre est ancré, et tourne avec elle, propriété considérée par la plupart des auteurs de l'époque comme signant la nature atmosphérique de l'aurore. La lumière produite par l'aurore boréale peut être, selon Halley, soit due au caractère

intrinsèquement lumineux de la matière magnétique, soit due au fait qu'elle réfléchit la lumière du soleil, soit due à des vapeurs et exhalaisons terrestres qui seraient soulevées par le jet de matière magnétique. La théorie de Mairan fait appel, non seulement à la matière subtile formant l'atmosphère du soleil, mais également à l'air subtil, matière distincte de l'air grossier et traversant les pores du verre, et dont le poids n'est donc pas mesuré par le baromètre à mercure. Ces deux matières sont supposées se mélanger, et se stratifier en fonction des différents types de particules solaires, cette stratification se traduisant par la structuration verticale vue dans les aurores boréales. C'est ce mélange qui est supposé rendre la matière solaire lumineuse. L'altitude considérable déduite par Mairan de l'observation des aurores (plusieurs centaines, voire un millier ou plus de kilomètres) exclut de considérer l'air ordinaire comme présent à de tels niveaux, sachant que la hauteur de l'air grossier responsable de la durée des crépuscules n'excède pas 70 km. L'air subtil, s'étendant jusqu'à de très grandes hauteurs (cf chap. 6), est le candidat idéal pour appuyer l'hypothèse de Mairan. Dans la théorie de Euler, ce sont les parties les plus subtiles de l'air, sans qu'il soit précisé s'il s'agit de l'air subtil (au sens de Mairan) à proprement parler, qui sont poussées par les rayons du soleil à des distances considérables de la Terre, pouvant atteindre plusieurs diamètres terrestres. Dans cette approche, les régions lumineuses de l'aurore sont situées en dehors de l'atmosphère, et rien ne peut être conclu quant à sa hauteur.

Nous ne reviendrons pas longuement sur les théories de Halley et de Mairan, qui ont été décrites dans les chapitres dédiés (cf chap. 3 & 4). Nous avons vu que l'auteur de l'article sur la hauteur de l'atmosphère dans le *Dictionnaire de physique* pose deux questions relativement à la détermination de la hauteur de l'atmosphère par l'observation des aurores, à savoir : (i) les structures aurorales vues par deux observateurs distants sont-elles identiques ? (ii) l'aurore a-t-elle bien lieu dans l'atmosphère ? La réponse de Halley à la première question dans son article de 1717 est clairement réservée, voire négative. Pour lui, les couronnes aurorales, qui se forment par « *la convergence d'un grand nombre de faisceaux s'élevant très haut à partir des régions entourant l'observateur, et se rencontrant près du zénith* » par un effet de perspective, sont des structures qui ne sont pas uniques et identiques vues de tous les lieux, mais différent pour chaque horizon différent ; « *exactement de la même façon que l'arc-en-ciel vu dans un même nuage n'est pas le même arc, mais diffère en fonction de l'œil qui le regarde* ». Comme nous l'avons dit, il situe l'aurore dans l'éther, pas nécessairement dans l'atmosphère. Il mentionne que « *les vapeurs extrêmement rares constituant la matière des faisceaux, étant élevées très au-dessus de l'atmosphère, sont, soit laissées derrière la Terre dans son*

mouvement de rotation d'ouest en est, soit ne suivent que partiellement ce mouvement », ce qui montre qu'il place bien l'aurore dans le référentiel tournant de la Terre, mais suppose qu'elle peut se produire au-dessus de l'atmosphère, à l'altitude à laquelle s'élève la matière magnétique dans son tourbillon autour de l'axe de l'aimant terrestre. Dans le système de Mairan, la stabilisation de la matière solaire, qui ne brille pas durant sa chute vers la Terre, et ne produit de la lumière qu'une fois mélangée à l'air terrestre, doit nécessairement rencontrer l'atmosphère pour se stabiliser, son mélange avec l'air le rendant lumineux. L'aurore, suivant cette théorie, est intrinsèquement atmosphérique, même si l'air concerné n'est pas l'air grossier du bas, mais un air subtil extrêmement étendu dont le poids échappe à la mesure de la pression dans le baromètre. Les estimations de hauteur faites par Mairan portent, non sur les couronnes aurorales dont parle Halley, mais sur les arcs auroraux, qui sont les structures les plus utilisées à l'époque et ultérieurement pour estimer la hauteur de l'aurore (celle du point central de l'arc, situé sur le méridien magnétique), structures visibles, bien terminées, et stables, se rétablissant rapidement en cas de dégradation temporaire. L'observation des arcs des aurores de 1716 et de 1726, vus simultanément depuis Lisbonne et Saint-Pétersbourg, implique pour le centre de l'arc une hauteur de l'ordre de 800 km. À partir des observations réunies par Maraldi de l'arc auroral de 1726, vu simultanément depuis la région parisienne, Marseille et Rome, Mairan déduit une hauteur de 1100 km. L'arc de l'aurore d'octobre 1731, observé de France et de Copenhague, culmine également autour vers 1000 km. L'estimation générale de la hauteur de l'atmosphère faite par Mairan est de 100 et 300 lieues (400 et 1200 km) suivant les aurores.

Euler, dans son traité de 1746, s'oppose à la théorie de Mairan, notamment au fait que l'atmosphère solaire puisse s'étendre (parfois) jusqu'à l'orbite de la Terre. Par ailleurs, il constate que certaines comètes ont des queues malgré qu'elles n'atteignent jamais l'atmosphère du soleil, ce qui contredit l'hypothèse de Mairan suivant laquelle la queue des comètes est constituée de matière solaire, celles-ci se rechargeant en matière solaire à chacun de leur passage près du soleil (cf chap. 3). Selon Euler, les queues de comète et la matière des aurores ne sont pas d'origine solaire. Pour Mairan, ainsi qu'il l'explique dans sa réponse à Euler datée de 1747, la croissance, en luminosité et taille, des queues cométaires au voisinage du soleil prouve un rechargement périodique de la comète en matière subtile tirée de l'atmosphère solaire, leur disparition progressive après le passage au périhélie marquant l'épuisement du réservoir constitué par captation de l'atmosphère solaire. Mairan n'exclut pas qu'un peu de la matière prélevée au passage précédent n'ait pas été perdue, ce qui expliquerait que certaines comètes puissent avoir une queue avant d'avoir atteint l'atmosphère solaire matérialisée par la

lumière zodiacale, répondant ainsi à l'objection de Euler. Mais pour lui, la matière légère et transparente des queues cométaires est une substance subtile, différente de la matière grossière qui constitue la basse atmosphère de la Terre. C'est ainsi qu'il explique que les rayons solaires puissent chasser cette matière dans la direction opposée au soleil, se situant ainsi dans la continuité de Kepler, qui a exprimé la même idée plus d'un siècle plus tôt. La similarité de transparence entre queue cométaire et lumière aurorale, ainsi que la légèreté nécessairement extrême de la matière des aurores, soutenue à haute altitude par l'air subtil, font dire à Mairan que la matière des aurores n'est pas celle de l'air ordinaire.

Euler, à la différence de Mairan, estime que la matière des queues cométaires est une matière ordinaire, semblable à celle de notre atmosphère, et qu'elle est repoussée par les rayons solaires. Euler, dans son essai, s'attarde beaucoup sur le cas de la queue cométaire. Il valide son hypothèse de l'effet répulsif des rayons solaires sur le cas cométaire, avant de s'intéresser aux aurores boréales. Concernant celles-ci, il fait l'hypothèse qu'elles se forment par expulsion vers l'espace des parties les plus subtiles de l'atmosphère chassées par les rayons solaires, phénomène intuitivement évident si l'on assimile les rayons à des corpuscules dans la théorie newtonienne, mais pas dans l'approche ondulatoire de Huygens. Il se réfère à des expériences de miroirs ardents concentrant les rayons sur une matière poudreuse qu'ils dispersent, expériences menées, selon Fouchy (1752), par Homberg en 1708. Mais cet effet n'est-il pas plutôt attribuable à la chaleur qui agite l'air ? Mairan réalise un tourniquet de fer léger équipé d'ailerons qu'il place au foyer d'une loupe de 20 cm de diamètre, et constate qu'il peut tourner indifféremment dans un sens ou dans l'autre, contredisant l'éventuelle action des rayons solaires appuyant sur les ailerons. Mairan évoque la possibilité de faire l'expérience du miroir ardent dans le vide, pour éliminer l'effet thermique d'agitation de l'air, mais note qu'une telle expérience ne peut être faite que dans un vaisseau transparent (donc de verre), et que l'air subtil, pouvant y pénétrer, est susceptible de créer par chauffage une agitation comparable à celle de l'air grossier, l'expérience, même si elle était faite, ne pouvant au final rien démontrer de manière définitive.

Euler indique pour la hauteur de l'atmosphère une valeur de un « *mille d'Allemagne* », soit environ 6,5 km, du même ordre de grandeur que celle déterminée par Kepler, puis Cassini, au XVII^{ème} siècle à partir des mesures de réfraction atmosphérique. Il considère que la hauteur de l'atmosphère déduite des crépuscules est de 180 km, valeur qui semble très surévaluée par rapport à la valeur généralement admise de 70 km, et invoque l'effet répulsif des rayons solaires

pour expliquer la durée des crépuscules. Ainsi, comme Kepler, il rejette l'estimation faite par le moyen des crépuscules, et propose, comme son prédécesseur, une explication alternative pour expliquer la durée longue des crépuscules, nonobstant la faible hauteur de l'atmosphère. Cette hypothèse d'une couche d'air subtil élevée, pendant environ une heure, d'une hauteur de typiquement 180 km par action des rayons solaires, lui sert à estimer la vitesse de déplacement des particules d'air chassées par les rayons solaire (180 km par heure), les particules atmosphériques pouvant être écartées d'un diamètre terrestre, ou plus, en quelques jours. Ces altitudes considérables expliqueraient que des aurores soient vues jusqu'à 60° du pôle. Mais Mairan souligne que dans ce cas, les particules atmosphériques expulsées, par le jeu de la réfraction des rayons, devraient plutôt converger vers la zone équatoriale dans la direction opposée au soleil, cette critique étant la plus sérieuse faite à l'hypothèse de Euler. Pour Euler, les aurores n'ont donc pas lieu dans l'atmosphère, mais à une distance considérable au-dessus de la surface terrestre. Il écrit :

Toutes les Observations qu'on a faites sur les Aurores Boréales, nous enseignent incontestablement, que la matière, dont la lumière produit ces Phénomènes, n'existe point dans notre Atmosphère ; mais qu'elle est extrêmement éloignée de nous. Car quoique sa vraie distance ne puisse pas être déterminée par les Observations, cependant l'éloignement des lieux, dans lesquels on voit souvent le même Phénomène à la fois, met en droit de conclure qu'il est placé à une très grande distance de la surface de la Terre.

Fouchy, dans l'Histoire de l'Académie des Sciences de 1752, résume ainsi, pour les critiquer, les hypothèses de Euler :

L'hypothèse de M. Euler peut être réduite aux trois propositions suivantes :

1.° Que la matière des Aurores boréales n'est composée que des particules subtiles de l'atmosphère terrestre.

2.° Que notre atmosphère n'excédant pas, selon M. Euler, un mille d'Allemagne, ou 3270 toises, & la matière de l'Aurore boréale étant placée beaucoup plus haut, peut-être à quelques milliers de milles, elle n'existe point dans notre atmosphère, mais en est extrêmement éloignée.

3.° Enfin que ces particules dont la lumière produit l'Aurore boréale, ne se trouvent placées aussi loin de la Terre, que par ce qu'elles y sont chassées par l'impulsion des rayons solaires.

Mais comment supposer que des particules de notre atmosphère puissent se trouver à une pareille hauteur assez denses, pour réfléchir vivement les rayons du Soleil, tandis que les crépuscules ne sont plus visibles au-delà de 15 ou 20 lieues? Pourquoi depuis ce terme jusqu'à celui où se retrouve la matière du phénomène, de même nature que celle qui cause les crépuscules, n'en retrouve-t-on aucun

vestige? pourquoi cette matière chassée hors de l'atmosphère dans un milieu non résistant, & par une force capable de surmonter la gravité qui la retient auprès de la Terre, n'est-elle pas rapidement entraînée à des distances immenses ? toutes difficultés auxquelles il ne paraît pas que M. Euler ait ni pensé, ni répondu.

Comment comprendre en effet que l'illumination causée par la matière chassée ne soit pas continue tout au long du trajet de cette matière, et également pourquoi la poussée des rayons solaires, comme dans le cas des comètes, ne s'exerce pas jusqu'à des distances plus considérables encore ? Et comment se fait-il qu'un air de même nature que celui qui est responsable de la lumière des crépuscules puisse être assez dense à des distances de plusieurs diamètres terrestres pour réfléchir sensiblement la lumière ? Fouchy note que la hauteur de l'atmosphère proposée par Euler n'est supérieure que d'une centaine de mètres à l'altitude d'un sommet enneigé découvert par Bouguer au Pérou, et s'étonne que la neige puisse tomber d'une hauteur aussi faible. Par ailleurs, les fumées qu'on voit s'élever à environ 1600 mètres au-dessus des volcans, dans la même région des Andes, montrent que la hauteur de l'atmosphère excède les 6,5 km estimés par Euler. Concernant la disjonction entre l'atmosphère et l'aurore dans la théorie d'Euler, Fouchy écrit :

M. Euler prétend que la matière de l'Aurore boréale n'existe point dans notre atmosphère, mais qu'elle en est extrêmement éloignée : en cas, pourquoi se trouve-t-elle assujettie à suivre exactement le mouvement diurne de la Terre ? circonstance qui, de l'aveu de tous ceux qui se mêlent d'observer, est le caractère qui sert à distinguer un météore qui existe dans l'atmosphère, d'avec un autre qui est au-delà.

Il signale aussi, comme Mairan, que l'aurore devrait être vue en régions équatoriales plutôt qu'à haute latitude dans l'hypothèse d'Euler.

Bertholon, à l'entrée AURORES BORÉALES du *Dictionnaire de physique*, parle de la hauteur des aurores boréales. Comme beaucoup de ses contemporains, il note que les aurores n'accompagnent pas le mouvement des étoiles dans leur mouvement apparent, mais suivent au contraire le mouvement de la Terre dans sa rotation sur elle-même, ceci contrairement à la lumière zodiacale. Il en conclut que les aurores doivent se produire dans l'atmosphère. Il écrit à propos de la hauteur de l'atmosphère déduite de l'observation des aurores :

[...] ; mais ces deux moyens [durée du crépuscule et pression de l'air] ne peuvent servir à déterminer exactement l'atmosphère, prise non pour l'amas d'air grossier qui est autour de la terre, mais pour le

fluide quelconque qui enveloppe à une plus grande distance le globe de la terre & qui participe à ses mouvements.

[...]

Cet académicien [Mairan] osa avancer, en 1726, à l'occasion de l'aurore boréale du 19 octobre, qu'il fallait que la matière de ce phénomène eût été à plus de soixante-dix lieues au-dessus de la surface de la terre ; & que s'il en jugeait par quelques observations particulières, sa hauteur serait plus grande. Cette proposition étonna alors, parce qu'on était alors dans le préjugé que l'atmosphère avait peu de hauteur.

Bertholon cite les estimations de hauteur faites par Mairan, mais également par Maupertuis et Boscovich, toutes de l'ordre de 400 à 1200 km. Il mentionne également une série de 54 observations, provenant de la deuxième édition du *Traité de l'aurore boréale* de Mairan (1754), qui conduit à une hauteur moyenne de l'aurore de 700 km. Cavendish publie en 1790 l'estimation de la hauteur d'une aurore survenue en 1786, à savoir la hauteur du centre de l'arc auroral, considéré comme la structure la plus fiable pour ce type d'estimation :

Il a été remarqué que, comme les arcs du type décrit dans ces documents n'ont généralement qu'un mouvement très lent, leur hauteur au-dessus de la surface de la Terre peut être facilement déterminée, à condition qu'ils soient observés à peu près au même moment, en des endroits suffisamment éloignés ; et ils semblent être les seuls météores du type aurore dont nous avons les moyens de déterminer la hauteur.

La valeur déduite des observations, dans l'hypothèse où c'est bien le même arc qui est vu par les différents observateurs, est comprise entre 83 et 113 km. Néanmoins, par analogie avec les couronnes aurorales, pour lesquelles l'effet de perspective modifie la figure d'une même couronne vue par des observateurs distants, il émet l'hypothèse que les arcs auroraux pourraient consister en bandes de matière larges dans le sens de la hauteur, mais fines dans le sens de la profondeur, de sorte qu'un observateur situé sous l'arc voit une bande étroite et bien définie, tandis qu'un observateur écarté du plan de l'arc voit une bande large et ténue, un observateur lointain, très écarté du plan de l'arc, ne la voyant quasiment plus. Il explique que si les arcs étaient toujours vus comme culminant au zénith de l'observateur, son hypothèse serait vérifiée, tandis que si l'on voyait généralement plusieurs arcs éloignés dans la direction perpendiculaire au plan de ces arcs, elle serait infirmée. Il conclut son article en jugeant que l'estimation des hauteurs par l'observation des couronnes est totalement fallacieuse, et que celle par l'observation des arcs l'est probablement aussi :

Dans l'aurore boréale commune, on voit fréquemment une arche dans la partie nord du ciel, formant une partie d'un petit cercle. Je ne peux pas prétendre dire à quoi cela est dû, mais il est probable qu'elle provient de courants de lumière qui semblent plus condensés lorsqu'ils sont vus dans cette direction que dans toute autre, et par conséquent que les courants qui forment l'arche pour un observateur à un endroit sont différents de ceux qui la forment pour un observateur à un endroit distant, et par conséquent qu'aucune conclusion quant à sa hauteur ne peut être tirée des observations de celle-ci à différents endroits. Des tentatives ont cependant été faites pour déterminer la hauteur de l'aurore à partir de ces observations, et même de celles de la couronne (il se réfère ici aux travaux de Bergman) ; bien que cette dernière méthode soit certainement parfaitement fallacieuse, et il est fort probable que la première le soit aussi.

Cet article montre à quel point la communauté des savants anglais, de Halley à Cavendish, doute des estimations d'altitude faites à partir de l'observation des arcs auroraux. Un autre savant anglais, John Dalton, publie dans ses *Observations météorologiques et essais* (1793) des estimations d'altitude faites sur des aurores vues entre mai 1786 et mai 1793 en deux lieux distants d'environ 75 km dans la direction NO-SE. La hauteur de l'arc lors de l'aurore du 15 février 1793 est de l'ordre de 250 km, avec néanmoins une incertitude considérable (130-1200 km). Cette incertitude résulte de la relative proximité des deux sites, et d'une erreur possible de 1-2° sur une parallaxe faible (5° entre les deux stations pour l'aurore en question). Ainsi, la proximité des stations peut sembler garantir que c'est bien le même arc qui est observé, mais c'est au détriment de la précision sur la hauteur. Dalton écrit, en parlant de lui plus jeune, quand il a commencé à étudier les aurores :

Il semblait suffisamment prouvé que l'aurore n'était pas en dehors de l'atmosphère terrestre, bien qu'il n'ait jamais rien vu qui permette de déterminer la hauteur réelle d'une quelconque apparition avec un degré de précision acceptable ; et comme l'atmosphère, ou du moins la partie grossière de celle-ci, est selon toute probabilité confinée à la hauteur de quinze ou vingt milles anglais, il ne voulait pas admettre la plus grande hauteur de l'aurore, à moins d'y être contraint par le résultat d'observations minutieuses et précises. L'idée qui prévalait également que l'aurore pouvait être entendue était une autre raison de penser qu'elle se plaçait à une hauteur modérée. - Les apparences, cependant, étaient en opposition directe avec la pensée ; - qu'une seule et même aurore pouvait être vue sur une vaste étendue de pays, dans des circonstances à peu près uniformes, et que certaines d'entre elles pouvaient apparaître simultanément en France, en Espagne et en Italie, alors qu'elles passent si rarement notre zénith dans le nord de l'Angleterre, était un argument très fort en faveur de leur grande hauteur. Les meilleures observations sur ces grands météores ardents (les globes de feu) qui survolent occasionnellement le pays, et qui sont observés d'endroits aussi éloignés, semblent prouver l'existence d'un fluide élastique à une hauteur de soixante ou quatre-vingt milles au moins, qui dépasse de loin

la hauteur de l'atmosphère telle que prescrite par les observations sur le baromètre, ou même par le crépuscule ; et si l'atmosphère dépasse la hauteur de quarante-cinq ou cinquante milles, telle que déterminée par les observations sur la durée du crépuscule, nous n'avons pas de données permettant d'en fixer les limites ; elle peut, pour ce que nous savons, atteindre quatre ou cinq cents milles.

Ainsi, partant d'un préjugé défavorable, il dit s'être peu à peu laissé convaincre que les aurores se produisent à une grande hauteur. Il mentionne que la hauteur de certains globes de feu a été estimée à 100-130 km (cf chap. 5), valeur supérieure aux hauteurs déduites de la pression de l'air et de la durée des crépuscules, et qu'en l'absence de données permettant de fixer la limite de l'atmosphère, il se peut que cette limite atteigne 600-800 km. Il insiste beaucoup sur la nécessité de s'assurer, pour les mesures de hauteur, que les observations sont simultanées, et qu'elles portent bien sur le même objet. Comme le note Dalton dans l'ajout de 1834 sur la hauteur de l'aurore (qui figure dans la deuxième édition de ses Observations météorologiques) :

[...] il y a, à ce jour, des personnes qui estiment que la hauteur de l'aurore est de mille milles, d'autres qui estiment que mille pieds sont plus proches de la vérité, et d'autres encore qui pensent que sa hauteur peut, dans certains cas particuliers, être l'un ou l'autre de ces extrêmes, ainsi que toutes les hauteurs intermédiaires.

Effectivement, différents témoignages du début du XIX^{ème} siècle, notamment de navigateurs, qui placent la lumière aurorale au niveau des nuages, privilégient une très faible hauteur des aurores. Cette hypothèse est notamment relayée par de savants de l'envergure de Arago et Humboldt, qui ne croient pas aux estimations de Mairan, et prennent parti plutôt pour Halley, qui a le premier insisté sur la difficulté intrinsèque à estimer la hauteur des aurores. Arago reprend à son compte la comparaison avec l'arc-en-ciel, dont la position est propre à l'œil de l'observateur. Dalton développe par ailleurs sa propre théorie de l'aurore, dont il attribue les manifestations lumineuses à un effet de l'électricité, et assimile la matière à une substance de nature ferrugineuse :

Je considère qu'il ne fait presque aucun doute que la lumière des aurores boréales, ainsi que celle des étoiles filantes et des grands météores, est uniquement électrique et que la combustion ne prend aucune part à ces phénomènes.

[...]

Or, à partir des conclusions des sections précédentes, nous sommes dans la nécessité de considérer les faisceaux des aurores boréales comme étant de nature ferrugineuse, car aucune autre matière n'est connue pour être magnétique, et par conséquent, qu'il existe dans les régions supérieures de

l'atmosphère un fluide élastique partageant les propriétés du fer, ou plutôt de l'acier magnétique, et que ce fluide, sans doute de par sa propriété magnétique, prend la forme de faisceaux cylindriques.

La mise en cohérence entre la grande hauteur des aurores boréales et la hauteur déduite de la pression de l'air est faite par Jacques Cassini, dans le deuxième quart du XVIII^{ème} siècle, qui élève considérablement vers le haut le sommet de l'atmosphère en postulant, sur la base d'observations de la pression aux altitudes des montagnes, que la loi de l'élasticité change en altitude, la dilatation se mettant à varier comme l'inverse du carré du poids comprimant au-dessus de 2000 mètres d'altitude. Il remonte ainsi à 2000 km d'altitude le niveau de pression atteint à 50 km, dans l'hypothèse où les dilatations sont supposées suivre la loi de Boyle-Mariotte. Cette loi est estimée empiriquement à partir de mesures de pression faites à différentes hauteurs de l'ordre de seulement quelques milliers de mètres, et il est évident que son effet, propagé à des altitudes de plusieurs dizaines de kilomètres, est considérable. Il n'est pas douteux, compte-tenu du prestige de Mairan, et au vu de la relative facilité avec laquelle ses estimations de l'altitude de l'aurore boréale ont été accueillies à l'Académie, que Cassini n'a pas hésité à proposer une hypothèse extrême sur la loi de variation de la dilatation avec l'altitude, sachant que Mairan plaçait les aurores très haut. Cassini publiera quelques années plus tard un article dans lequel il portera la hauteur du sommet de l'atmosphère à 40 000 km dans une approche destinée à réconcilier la théorie des tourbillons de Descartes et les lois de Kepler. Notons que Laplace placera aussi le sommet de l'atmosphère à cette altitude, qui correspond au niveau au-dessus duquel la force centrifuge s'exerçant sur une particule d'air, supposée tourner à la même vitesse angulaire que la Terre, l'emporte sur la force de gravité. Outre-Manche, les savants se montrent nettement plus réservés quant à la validité des mesures par la méthode des parallaxes de la hauteur de l'arc auroral, dont on peut penser que la figure dépend de la position de l'observateur.

5. Deux autres méthodes d'estimation de la hauteur de l'atmosphère

5.1 Globes de feu et étoiles filantes

Dalton cite les mesures de hauteur effectuées sur les globes de feu, celles-ci suggérant que l'atmosphère s'étend nettement au-dessus du niveau des dernières couches d'air responsables de la lumière crépusculaire. L'observation et la réflexion scientifique sur les bolides est principalement portée au XVIII^{ème} siècle par des savants anglo-saxons, Halley d'abord, puis

Pringle, Clap, Blagden (cf chap. 5). Dalton, à la fin du XVIII^{ème} siècle, est donc particulièrement bien informé des avancées dans ce domaine. Nous avons vu que pour les savants du XVII^{ème} siècle, les globes de feu sont des météores d'origine atmosphérique, formés par inflammation d'exhalaisons dans les basses couches, les matières enflammées, du fait de leur légèreté, s'élevant jusqu'à la surface de l'atmosphère, à la frontière de l'éther, et y flottant jusqu'à ce qu'elles s'éteignent. La cohérence entre l'altitude estimée du globe de feu de 1676 et la hauteur déduite de la durée des crépuscules est notée, nous l'avons vu, par l'auteur de l'article sur la hauteur de l'atmosphère du *Dictionnaire géographique* (1726). Ce paradigme ne sera remis en question qu'à la fin du XVIII^{ème} siècle par Ernst Chladni, qui comprend que c'est l'échauffement par friction du bolide, à son entrée dans l'atmosphère, qui est responsable de son incandescence. Halley affirme dans un premier temps (1714) le caractère extraterrestre des bolides, pour se rétracter peu après (1719), assimilant les globes de feu à des flammes se propageant le long de traînées de matière inflammable constituées dans la haute atmosphère à partir des exhalaisons terrestres. Le détail de l'évolution des idées en la matière au cours du XVIII^{ème} siècle a été présentée précédemment (cf chap. 5).

Le premier événement de ce type documenté remonte à 1623, et s'est produit au-dessus de l'Allemagne. La hauteur du bolide a été estimée à 148 km à partir des hauteurs angulaires estimées par différents témoins en différents lieux, valeur élevée sur laquelle l'incertitude est probablement grande. Le bolide du 21 mars 1676 observé dans le ciel de Bologne a fait l'objet d'un essai publié par Montanari (*Fiamma Volante*), qui en a été le témoin direct. Son altitude a été estimée à 60 km, et sa vitesse à 4 km/s. Sa dimension apparente équivalait à celle de la lune, impliquant un diamètre d'au moins 800 m. Ce globe de feu, ainsi que trois autres apparus sur l'Allemagne et l'Angleterre entre 1680 et 1708, constituent, avec le bolide qui a survolé l'Angleterre en 1708, le sujet du premier article de Halley (1714). Un nouveau bolide survole l'Angleterre en 1719, qui donne lieu au second article de Halley (1719), dans lequel il estime la hauteur de l'objet à 110 km. Le bolide qui survole Cambridge en 1758, décrit par John Pringle dans un article de 1759, explose à 65 km d'altitude. Près de cinquante ans après le premier article de Halley, Pringle est le premier à reprendre, et amplifier, la première interprétation de Halley suivant laquelle les bolides sont d'origine extraterrestre.

Blagden présente en 1784 une théorie électrique des globes de feu et étoiles filantes. Il termine ses réflexions par une classification en termes de stratification atmosphérique des phénomènes électriques. L'idée d'une origine atmosphérique des étoiles filantes et des globes de feu reste

encore à cette époque très ancrée dans les esprits, comme en témoigne l'extrait du traité de Bergmann de 1783 déjà cité (cf chap. 5). Ces idées persisteront longtemps, puisque l'astronome Coulvier-Gravier, grand observateur des étoiles filantes, continuera dans ses *Recherches sur les Météores* publiées en 1859 à défendre la thèse d'une origine atmosphérique de ces corps, dont il pense avoir mis en évidence leur lien avec la météorologie et le climat. Chladni, dans son fameux article de 1794, relate vingt événements survenus entre 1676 et 1783. Il décrit des masses de pierre et de fer tombant du ciel et formant des globes de feu en entrant dans l'atmosphère. Ce sont pour lui des corps issus du système solaire, soit qui n'ont pas été soumis à l'accrétion qui a conduit à la formation des planètes, soit qui proviennent de débris de planètes. Il écarte plusieurs explications avancées avant lui : le lien avec la lumière zodiacale, celui avec les aurores boréales, l'idée de nuages ou de trainées de gaz inflammables dans la haute atmosphère, les phénomènes électriques comme les éclairs. Il pense que le chauffage se fait directement par friction entre la surface du bolide et l'atmosphère et que l'ensemble du corps entre en fusion et se dilate jusqu'à la taille considérable à laquelle il est observé. L'affirmation du rôle de l'interaction frictionnelle entre le corps solide et l'air environnant change le paradigme issu du siècle précédent, puisque le sommet de l'atmosphère n'est plus dorénavant la surface où viennent nager des feux préalablement allumés, ou des vapeurs qui s'y transforment en trainées inflammables, mais celle au-dessous de laquelle le contact à grande vitesse avec l'atmosphère initie la combustion de la matière du bolide à son entrée dans la haute atmosphère. Suite à la recommandation de Chladni d'effectuer des mesures trigonométriques à grande base des étoiles filantes, et sous l'impulsion de Lichtenberg, une campagne de mesures est menée par Brandes et Benzenberg en 1798 (cf chap. 5). Ils observent plus de 400 étoiles filantes, dont une vingtaine seulement sont vues par les deux observateurs simultanément. Les altitudes restituées sont comprises entre 14 et 145 km, avec une moyenne autour de 80-90 km, les vitesses estimées (dans 2 cas seulement) étant de 21 et 29 km/s. La valeur médiane de l'altitude de disparition est de 80 km. Ainsi, à l'aube du XIX^{ème} siècle, la hauteur de l'atmosphère estimée à partir de l'observation des globes de feu et des étoiles filantes est de l'ordre de 60 km à 150 km, valeur supérieure à la hauteur déduite de la durée des crépuscules, mais très inférieure à celle des aurores boréales.

5.2 Projection de l'ombre de la Terre durant les éclipses de lune

Guillaume Le Gentil traite la question de la correction à apporter au demi-diamètre de la Terre lors des éclipses de lune (1705). Il explique que la correction à apporter a été évaluée

différemment par différents auteurs : 60'' (secondes d'arc) par La Hire (≈ 120 km), 20'' par Cassini (≈ 40 km), 30'' par d'autres (≈ 60 km). Kepler, qui attribue à l'atmosphère une faible hauteur (3,6 km) ne fait aucune correction. Le Gentil, à partir de ses propres observations, propose ses valeurs, qui diffèrent suivant qu'il s'agit d'éclipses centrales (40'') ou partielles (100''), ce qu'il explique par une atmosphère plus haute de 110 km aux pôles qu'à l'équateur. Globalement, l'épaisseur de l'atmosphère déduite par cette méthode, très imprécise, paraît se situer dans la gamme comprise entre 60 km et 120 km, ce qui est cohérent avec la valeur aujourd'hui communément utilisée, qui est de $1/73^{\text{ème}}$ du rayon terrestre, soit 90 km. Ce résultat est très peu cité dans la littérature du XVIII^{ème} siècle, la méthode n'ayant pas été reprise et développée dans le but d'améliorer l'estimation de la hauteur de l'atmosphère.

6. Conclusion

Jean-Sylvain Bailly, dans son *Histoire de l'Astronomie Moderne* (qui couvre « jusqu'à l'époque de 1730 »), dont la première édition date de 1775, décrit ainsi la structure verticale de l'atmosphère :

Il résulte de ces recherches que notre atmosphère renferme trois régions différentes, qui chacune ont leur destination. La première, la plus basse, est celle de l'air grossier, qui détourne les rayons de lumière & produit la réfraction ; elle s'élève à peine à 7000 toises. La seconde est celle de l'air, qui pèse sur le mercure & le soutient à 28 pouces ; c'est un air qui conserve encore assez de masse & de densité pour arrêter la lumière & nous la renvoyer par la réflexion. Il allonge le jour en donnant naissance aux crépuscules ; cette région tient le milieu, & monte à quinze ou vingt lieues. Enfin la troisième, celle qui s'étend jusqu'à 175 lieues, est composée d'un air plus subtil, où la lumière se disperse librement. Cet air n'a aucune puissance sur elle ; il ne peut ni la réfracter ni la réfléchir. M. de Mairan pense que les colonnes élevées de ce fluide ne contribuent point à soutenir le mercure dans le baromètre, parce que c'est un air si subtil qu'il pénètre à travers le verre & se met en équilibre avec lui-même. Cette troisième zone est le théâtre des aurores boréales.

L'abbé Cotte, dans son *Traité de météorologie* (1774), propose une stratification analogue, révélant l'accord existant entre les savants sur cette question à la fin du XVIII^{ème} siècle :

On a coutume de diviser l'atmosphère en trois régions :

1.° La région inférieure qui s'étend depuis la surface de la Terre, jusqu'à deux ou trois lieues au-dessus de nous. Cette région est le lieu de toutes les vicissitudes aériennes sensibles, des météores proprement dits, & des réfractions astronomiques.

2.° *La moyenne région, qui commence à la dernière couche de la région inférieure, & s'étend jusqu'à 15 ou 20 lieues [60 ou 80 km] de hauteur tout au plus.*

3.° *La région supérieure d'une étendue ou d'une épaisseur indéfinie, & que M. de Mairan dans son Traité de l'Aurore boréale prouve devoir s'étendre à deux ou trois cents lieues [huit cents à douze cents kilomètres] de hauteur.*

Ces résumés constituent un bon aperçu des connaissances sur la hauteur de l'atmosphère à cette époque, synthétisant au sein d'une même représentation les hauteurs déduites des mesures de réfraction, de la durée des crépuscules et des aurores boréales. Ces hauteurs sont associées à la présence de diverses matières subtiles introduites tout au long du XVIII^{ème} siècle : air subtil et matière solaire pour l'expliquer l'aurore boréale selon Mairan, matière magnétique pour expliquer l'aurore boréale selon Halley, matière réfractive pour expliquer la réfraction selon Cassini. La matière électrique a également été introduite pour expliquer les globes de feu et les étoiles filantes, dont l'altitude est intermédiaire entre celles de la deuxième et troisième régions définies par Bailly. Vers la même époque, Charles Blagden propose une stratification verticale de l'atmosphère, mais en termes de phénomènes électriques, avec l'extrait suivant, déjà reproduit au chapitre 5 :

Si les conjectures précédentes sont exactes, des régions distinctes doivent être attribuées aux phénomènes électriques de notre atmosphère. Ici-bas, nous avons le tonnerre et les éclairs, dus à la répartition inégale du fluide électrique entre les nuages ; dans les régions plus élevées, où les nuages n'arrivent jamais, nous avons les différentes gradations des étoiles filantes ; jusqu'à ce que, au-delà des limites de notre atmosphère crépusculaire, le fluide soit mis en mouvement en masses suffisantes pour maintenir une trajectoire déterminée et présenter les différentes apparences de ce que nous appelons des globes de feu ; et probablement à une altitude encore plus grande au-dessus de la terre, l'électricité s'accumule sous une forme plus légère et moins condensée, pour produire les courants et les coruscations merveilleusement diversifiés des aurores boréales.

Ainsi, nous sommes passés, en un siècle, de la conception d'une atmosphère essentiellement d'une seule nature, incluant éventuellement une composante d'air subtil, à une atmosphère structurée verticalement, présentant des couches de différentes caractéristiques se manifestant par des phénomènes physiques spécifiques. La hauteur de l'atmosphère n'est plus unique, mais multiple, et elle se décline différemment en fonction du type de matière impliquée, suivant, par exemple, qu'il s'agit de l'air (classifications de Bailly ou de Cotte) ou de la matière électrique (classification de Blagden). Il reste bien entendu de nombreuses zones d'ombre, par exemple sur la nature exacte des aurores boréales, ou sur les mécanismes d'ignition des globes de feu et

des étoiles filantes, mais la pensée, dans le foisonnement des matières subtiles introduites et des hypothèses faites au cours du Siècle des Lumières pour estimer la hauteur de l'atmosphère, et mettre en cohérence les hauteurs déduites des différentes méthodes, a permis de poser des bases partagées par l'ensemble des communautés scientifiques impliquées, socle général à partir duquel se développeront les avancées majeures du siècle suivant.

Chapitre 9 : Atmosphères des corps terrestres

1. Introduction

L'article ATMOSPHERE de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751) fait une brève allusion à l'atmosphère des corps solides :

Atmosphère des corps solides ou durs, est une espèce de sphère formée par les petits corpuscules qui s'échappent de ces corps. Voyez SPHERE & EMANATION.

M. Boyle prétend que tous les corps, même les plus solides & les plus durs, comme les diamants, ont leur atmosphère.

On trouve à l'entrée SPHERE les précisions suivantes :

La sphère d'activité d'un corps est un espace déterminé & étendu tout autour de lui, au-delà duquel les émanations qui sortent du corps, n'ont plus d'action sensible. Voyez ATMOSPHERE.

Ainsi nous disons que la vertu de l'aimant a de certaines bornes au-delà desquelles cette pierre ne peut point attirer une aiguille ; mais partout où l'aiguille est placée, pourvu qu'elle puisse être mise en mouvement par l'aimant, on dit qu'elle est dans la sphère d'activité de l'aimant. Voyez AIMANT.

Ainsi, les deux corps de référence, pour ce qui est de l'atmosphère des corps, sont, d'une part l'atmosphère, dont on a vu qu'elle contient de nombreuses particules émises par la terre sous la forme de vapeurs et d'exhalaisons, d'autre part l'aimant, dont la sphère d'influence est délimitée par son atmosphère magnétique, concept dont on a vu qu'il prend le relais de l'objet cartésien de tourbillon dans la première moitié du XVIII^{ème} siècle. L'émanation est le processus par lequel les corps relâchent vapeurs et exhalaisons, ainsi qu'on peut le lire à l'entrée ÉMANATIONS : « on appelle ainsi des écoulements, ou exhalaisons de particules ou de corpuscules subtils, qui sortent d'un corps mixte par une espèce de transpiration ». Le caractère subtil des corpuscules émis tient, selon Boyle, à leur extrême mobilité, car ils se meuvent à grande vitesse et en tous sens, et à leur pouvoir de pénétration. Les plantes et les animaux transpirent, les fluides s'évaporent, les corps odoriférants envoient des émanations qui excitent en nous la sensation de l'odeur. Certains corps semblent ne perdre aucun poids malgré l'envoi d'émanations continues. Cela pourrait être dû, selon Perrault, aux nombreuses émanations répandues dans l'air par les différents corps, qui viendraient en permanence les recharger,

compensant la perte de matière par un apport nouveau. Les émanations retiennent en général les propriétés des corps dont elles proviennent, même après avoir passé dans les pores d'autres corps solides. L'exemple de la matière magnétique est donné : « *c'est ainsi que les émanations magnétiques pénètrent même les corps les plus solides, sans souffrir aucune altération dans leur nature, ni rien perdre de leur force* ». L'autre exemple fourni concerne la matière lumineuse : « *Plusieurs auteurs, à la tête desquels est M. Newton, veulent que la lumière soit produite par une émanation de corpuscules qui s'élancent du corps lumineux. Si ce système, qui est appuyé sur des preuves très fortes, était vrai, il servirait à prouver combien les émanations peuvent être subtiles, & à quelles distances énormes elles peuvent s'étendre* ». La subtilité de la matière issue de l'émanation est parfaitement illustrée par ces deux exemples de la matière magnétique et de la lumière. Il faut cependant remarquer que vapeurs et exhalaisons ne sont pas de nature subtile, au sens de la matière subtile, et que le terme de subtil utilisé pour caractériser les produits de l'émanation, qui peut être pris au pied de la lettre pour certaines matières (magnétique, lumineuse), doit pour d'autres être assimilé plutôt à la petitesse et la finesse des corpuscules émis, les vapeurs et exhalaisons étant d'ailleurs considérées comme de la matière grossière, à la différence de l'air pur. Mais c'est dans le *Dictionnaire de physique* (1793), à l'entrée ATMOSPHÈRE DES CORPS TERRESTRES, qu'on trouve la plus grande partie des éléments de base relatifs à cette composante atmosphérique des corps, qui apparaît et s'enrichit dans la littérature scientifique au milieu du XVIII^{ème} siècle :

Il y a des physiciens qui ont prétendu que tous les corps terrestres, de quelque nature qu'ils fussent, étaient entourés d'une atmosphère particulière. Les corps les plus durs, selon eux, ont une espèce d'enveloppe sphérique, formée par les petits corpuscules qui s'en échappent ; Boyle est de ce sentiment, & prétend que les diamants & tous les corps les plus solides ont leur atmosphère. Cette assertion peut être entendue de deux manières : 1°. en ce sens, que tous les corps sont enveloppés d'une atmosphère quelconque, d'une matière qui peut être commune à tous ; 2°. de sorte que cette atmosphère particulière soit formée d'une matière propre à chaque espèce de corps.

Dans la catégorie des atmosphères communes aux différents corps, on trouve en premier lieu l'atmosphère d'air qui entoure tous les corps, car l'air adhère aux corps solides. Tous les corps ont une atmosphère d'air qui est transportée avec eux, et dont ils ne se séparent que difficilement après que le contact réciproque ait eu lieu. Et cela est prouvé par le comportement de l'aiguille d'acier qui, posée sur l'eau, n'y coule pas, bien qu'elle soit huit fois plus pesante que son volume d'eau, s'enveloppant d'une petite gondole d'air. Et la preuve que cette gondole d'air est ce qui maintient l'aiguille à la surface de l'eau est que, si on la mouille, l'aiguille ne flotte

plus. On peut étendre aux grands corps cette propriété qu'ont les petits corps de s'entourer d'une atmosphère d'air plus dense que l'air ambiant. L'article ADHÉRENCE du *Dictionnaire de physique* (1793) dit de l'adhérence :

C'est l'état de deux corps qui sont joints & tiennent l'un à l'autre, soit par leur propre action, soit par la compression de quelques fluides extérieurs. [...] C'est par l'adhérence que des particules d'air s'attachent à la surface de la plupart des corps ; c'est par la cohérence que des parties du bois, des pierres & des métaux, sont jointes entre elles. La force par laquelle des corps adhèrent entre eux, est moins considérable que celle qui fait cohérer les parties des substances entre elles.

Adhérence et cohérence sont clairement distinguées. La cohérence, on l'a vu, est attribuée à la pression exercée par l'atmosphère, voire, pour ceux qui jugent cette action insuffisante, à la pression exercée par un air subtil s'étendant très loin au-dessus de la terre, et donc extrêmement pesant, ainsi que le propose par exemple Perrault. Concernant l'adhérence, on remarque qu'outre l'air, l'humidité constitue aussi une atmosphère autour des corps, dont la superficie est recouverte d'une vapeur aqueuse, très faible dans les temps secs, très marquée dans les temps humides. Petit explique que l'aiguille flotte par l'adhérence des parties de l'eau entre elles, qui empêche l'aiguille de les diviser, et non par l'adhérence de l'air à l'aiguille. Il se base pour avancer cette explication sur le fait que, quand on chauffe l'eau, l'aiguille coule. Mais l'auteur de l'article explique ce phénomène sans faire appel à l'adhérence des parties de l'eau : en chauffant l'eau, on chauffe l'air autour de l'aiguille, ce qui le dilate et fait qu'il est en partie chassé, provoquant le contact entre l'eau et l'aiguille, qui par conséquent coule. L'inexactitude de l'explication de Petit est démontrée par l'expérience qui consiste à poser sur l'eau une feuille métallique très mince et de grande superficie. Celle-ci flotte, bien qu'étant plus dense que l'eau, et il faut la charger d'un poids pour qu'elle coule. Si ce phénomène était dû à l'adhérence des parties de l'eau entre elles, la feuille, une fois au fond de l'eau, y resterait. Or, si elle n'est chargée d'aucun poids, elle remonte toute seule. Et cela est dû à l'atmosphère d'air de la feuille, une certaine quantité d'air adhérent à la feuille, d'autant plus grande que sa surface est grande. Et c'est d'autant plus vrai que, lorsqu'on froisse la feuille, en diminuant sa surface, elle coule. Une troisième expérience prouvant l'existence d'une atmosphère d'air autour des corps est la production de bulles d'air par des corps durs, même très durs et très polis (marbres, métaux, bois dur), immergés dans l'eau. L'expérience est d'autant plus sensible que le temps est sec, et que les surfaces sont grandes. Le corps, s'il est préalablement chauffé, ou mouillé, émet moins de bulles. Il en émet d'autant plus qu'il est poreux.

Concernant les atmosphères particulières, se pose la question de savoir si tous les corps en possèdent une. Si certains corps ont sans aucun doute une atmosphère particulière, composée d'une matière analogue à celle du corps dont ils sont issus, est-ce vrai de tous les corps ? Un morceau d'or ou d'argent, ou une pierre, ont-ils une atmosphère particulière ? On a dit que la diffraction des rayons lumineux par l'angle d'un corps dans une chambre obscure peut provenir de son atmosphère, mais on peut aussi attribuer le phénomène à l'attraction exercée par le corps sur les rayons. Il semble indiscutable qu'un certains nombres de corps ont une atmosphère particulière, à savoir les corps ignés, lumineux, électriques, magnétiques, ou encore les animaux, les végétaux, les corps odoriférants.

Mais nous prévenons ici que ces atmosphères ne sont point mues comme de petits tourbillons, leur existence est bien loin d'être prouvée. Le grand nombre des particules dont sont composées les atmosphères des corps terrestres, n'a d'autre mouvement que celui de s'élever dans la masse de l'air environnante ; une autre partie se répand en tous sens, & une dernière enfin reste plus ou moins adhérente à la surface des corps.

L'auteur passe ensuite en revue les différents types de corps énoncés plus haut. Les corps ignés sont les corps incandescents ou enflammés, brûlants ou chauds, et l'atmosphère de feu est leur sphère d'activité. La chaleur se fait sentir à distance, et son intensité est en raison inverse du carré des distances. La matière du feu entraîne avec elle en s'échappant certaines parties propres du corps enflammé, qui perd donc du poids. La matière constituant l'atmosphère de feu n'est donc pas seulement composée du calorique. Les corps lumineux ont autour d'eux une atmosphère lumineuse, par exemple la bougie, et constituent le centre de leur sphère d'activité. La perte progressive de substance de la bougie prouve l'existence de l'atmosphère lumineuse. Une part de cette atmosphère est transportée avec le corps lumineux, une autre est dissipée au loin et lui devient étrangère. Un aimant ou un morceau de fer aimanté possèdent une atmosphère magnétique, qui se manifeste à travers l'arrangement de la limaille de fer sur un carton placé au-dessus d'eux. La limaille s'arrange en courbes régulières, ou se meut, s'élève et s'abaisse quand on bouge l'aimant, ce qui implique l'existence d'une atmosphère magnétique, avec peut-être une circulation de matière magnétique. Les corps électriques, comme un tube de verre électrisé, produisent des effets à distance, créant sur la peau la sensation du contact avec une toile d'araignée, ou émettant de la lumière et des étincelles. La matière responsable de ces effets est analogue à la lumière et au feu, et constitue l'atmosphère électrique de ces corps. Les corps

odoriférants émettent des effluves, qui produisent un effet sensible sur l'organe de l'odorat. Les végétaux transpirent, relâchant des vapeurs en grande partie aqueuses, qui sont dissipées continuellement dans la masse de l'air. Ces vapeurs émises sont sans cesse remplacées par d'autres qui viennent prendre leur place au sein des corps transpirant. Une partie de ces vapeurs séjourne un certain temps à la surface des plantes du fait de son adhérence. Les animaux transpirent, et on estime que sur huit livres de nourriture ingérées, cinq s'échappent en transpiration

L'idée même d'émanation d'une atmosphère particulière au corps suppose que ce corps est poreux, contenant dans ses pores les produits de cette émanation. Nous allons donc dans un premier temps (partie 2) examiner les connaissances de l'époque sur la porosité des corps, avant d'aborder la partie 3 consacrée à l'atmosphère proprement dite des corps solides, que nous entamerons par un examen du traité de Boyle sur la question. Puis nous y aborderons la question de la dissolution de l'air dans les corps liquide, avec la théorie de la matière aérienne de Mariotte, puis celle des énormes facteur de dilatation de volume observés par Nollet, et Hales, pour les vapeurs produites par distillation à partir de certains corps, Nollet proposant sa propre théorie en termes de compression extrême de la matière élastique dans les pores fins. Puis nous décrirons la théorie de Perrault, qui explique la formation de la glace par une circulation incessante de matière entre les atmosphères des corps et l'atmosphère globale de la terre. Nous nous intéresserons ensuite aux atmosphères magnétiques et électriques, dont les cas ont été traités séparément dans les chapitres consacrés à ces matières, en décrivant la théorie de Béraud unifiant ces deux matières au sein d'une conception d'inspiration cartésienne. La dernière section de la partie 3 sera dédiée au fluide igné et aux atmosphères lumineuses, que Marat a observés grâce à un microscope solaire, dans le contexte des théories de la combustion initiées par Hooke, puis reprise par Lavoisier un siècle plus tard. Nous aurons ainsi passé en revue la quasi-totalité des types d'atmosphères mentionnés sans l'article ATMOSPHÈRE DES CORPS du *Dictionnaire de physique* (1793).

2. Porosité des corps

2.1 *Traité fondateur de Boyle*

Dans son *Essai sur la porosité des corps solides* de 1684, Boyle introduit deux types de preuves de la porosité des corps, le premier provenant de connaissances a priori sur l'origine et la formation des corps durs, sur leur densité, ou sur leur constitution physique, le second étant tiré d'expériences a posteriori menées sur ces corps. Sur l'origine et la formation des corps, on sait que certaines pierres, et pierres précieuses, ont, avant d'acquérir leur dureté, été des substances molles, des liqueurs, au sein desquelles des corpuscules de figures variées et très irrégulières, comme on en voit dans les liqueurs terrestres, ont été amenés au contact les uns des autres par le hasard, le froid, ou d'autres agents, ce qui implique la présence de pores. Concernant la densité des corps, une densité élevée peut signifier, soit que les corpuscules constituant le corps sont plus denses, soit qu'à même densité ils sont plus rapprochés, avec des pores plus petits. Les pierres, comme le silex, atteignent rarement le triple de la densité de l'eau. Mais la densité du fer et de l'étain, les métaux les plus légers, est double de celle du marbre, du silex et du cristal. L'or, le métal le plus dense, l'est plus de deux fois plus que le fer. D'où il suit qu'une matière métallique ayant la densité du fer pourrait être contenue dans un volume plus de deux fois plus petit, si elle était dans le même état de compacité que l'or. Or, l'or lui-même est poreux, puisqu'il est dissout par le mercure. La troisième preuve a priori porte sur la constitution physique des corps, dont les figures et les tailles des particules qui les composent, dont on ne peut pas supposer qu'elles se touchent exactement, renseignent sur la taille des espaces vides. Il y a très peu de figures telles que les particules ne laissent aucun intervalle libre. Et même si une figure géométrique le permet théoriquement, les corpuscules physiques n'ont jamais exactement, dans la nature, la forme qu'ils devraient théoriquement avoir. Même les matériaux les plus durs employées pour le polissage (émeri, pierre ponce, ...) consistent en petits corpuscules anguleux et durs, qui doivent nécessairement laisser des interstices. A partir de l'ensemble de ces preuves a priori, on peut ainsi se faire une première idée du degré de porosité des corps.

Les preuves a posteriori consistent en expériences variées que Boyle passe en revue. Plusieurs expériences sont faites sur la porosité du bois, soit qu'on verse du mercure dans un tube de bois, celui-ci sous le poids de sa propre colonne passant à travers le bois dans la partie inférieure du tube, et perlant en gouttes sur la paroi extérieure, soit qu'on pompe l'air d'un côté d'une paroi

de bois (même de grande épaisseur), et qu'on voit l'air extérieur filtrer à travers le bois vers le côté vidé de son air. Des expériences menées sur de fines lamelles de bois montrent que la fumée d'une liqueur, passant à travers une lamelle, ou plusieurs lamelles disposées en série, teinte un demi-penny de cuivre, l'intensité de la coloration décroissant, et le délai d'apparition de la couleur croissant, avec le nombre de lamelles interposées. L'odeur, de la même façon, se transmet à travers les lamelles. Boyle s'intéresse ensuite à la porosité de la terre cuite. La distillation sur un feu intense du vitriol ou du salpêtre dans des vases de terre cuite conduit à l'émission de grandes quantités de vapeurs qui passent à travers les parois du récipient. La fabrication du cidre dans des bouteilles de terre cuite durcies au feu montre l'apparition d'une rosée sur l'extérieur de la bouteille, qui n'est pas due à la condensation de la vapeur dispersée autour de la bouteille, ainsi que le révèle le goût de ce dépôt. L'argent maintenu en fusion dans un pot de terre cuite passe à travers ses pores, comme le montre la multitude de petits globules d'argent apparaissant sur la paroi externe du pot. Le chapitre suivant est consacré aux pierres. Certaines pierres naturelles sont perméables à l'eau. L'Oculus Mundi, opaque dans l'air sec, plongée dans l'eau devient transparente, puis redevient opaque, quand l'eau s'en évapore. L'explication, selon Boyle, est que l'eau rectifie les pores courbes de la pierre et les rend droits, permettant aux corpuscules de lumière de la traverser. Pour la même raison, une feuille de papier trempée dans l'huile devient transparente. Certaines pierres, comme l'émeri, ou les grenats, ou encore les pierres précieuses, souvent très dures, comportent des métaux et, du fait qu'elles constituent un mélange de substances différentes, sont probablement poreuses. Le marbre est nécessairement poreux, puisqu'il est dissout par l'eau forte (acide nitrique) et l'esprit de sel (acide chlorhydrique). L'aimant est poreux de par les effluves qui le parcourent.

Boyle passe ensuite aux métaux. Des liqueurs telles que l'eau forte, l'esprit de sel, l'esprit de vinaigre (acide acétique) ou l'eau régale (mélange d'eau forte et d'esprit de sel), dissolvent les métaux comme l'or (eau régale), le plomb (eau forte, esprit de vinaigre) ou le cuivre (eau forte, eau régale, esprit de vinaigre, esprit de sel). Allant plus loin, il se demande s'il existe des corps non fluides capables de pénétrer les métaux sans les fondre, l'existence de tels corps, si elle était avérée, démontrant la porosité des métaux de manière irréfutable. Il dispose pour cela dans un creuset un empilement de couches, alternativement de poudre de soufre et de cuivre laminé sous forme de petites plaques. La première couche et la dernière sont de soufre. Il recouvre l'ensemble d'un couvercle de terre cuite pour éviter que le soufre ne prenne feu, puis dispose le creuset près des charbons, mais à une certaine distance, pour que le chauffage se fasse lentement, par degré. On laisse celui-ci opérer plusieurs heures, le soufre fond peu à peu, mais

le métal n'entre pas en fusion. À la fin de l'expérience, le couvercle est retiré. On observe que les plaques de cuivre ont subi une altération de couleur et de texture, et sont devenues extrêmement friables. Et voici ce qu'observe Boyle :

Et [...] bon nombre des plaques, quand elles étaient cassées en deux, semblaient avoir été (par les couches contiguës de soufre du dessus et du dessous) chacune divisée horizontalement en deux plaques, dont plusieurs en différents endroits présentaient un écartement important ou une cavité entre elles : et il était observable, quand je considérais attentivement l'une ou l'autre de ces plaques dans les parties qui étaient contiguës avant que je les casse, que je pouvais discerner une multitude, pour ainsi dire, de fibres joignant un côté plat de la plaque à l'autre, la plupart d'entre elles, en termes d'orientation, étant parallèles entre elles. Ces circonstances montrent suffisamment que les plaques ont été percées de part en part par le soufre ; mais pour le confirmer, et aussi montrer que le soufre imprègne, pour ainsi dire, le corps du métal, et vient largement s'y loger, j'ajouterai que non seulement à l'œil les plaques apparaissaient gonflées, plus épaisses que quand elles y avaient été placées, mais aussi que les ayant pesées avant que l'opération commence, et après qu'elle soit terminée, le cuivre, bien que non libéré du soufre qui adhère à sa surface, présentait un accroissement de masse considérable dû à l'adhésion du soufre, lequel (pour ajouter à cette évidence), bien qu'il n'apparaisse pas à l'œil, se manifestait, pour peu qu'une plaque soit posée sur des charbons ardents, et soufflée, par une flamme bleue.

Ainsi, les plaques de cuivre, qui n'ont jamais été en fusion, ont été traversées de part en part par le soufre, laissant la trace d'une multitude de fibres parallèles, manifestation du caractère poreux du cuivre. Et pesant le cuivre ainsi pénétré par le soufre, il attribue l'augmentation constatée à la présence du soufre qui, bien qu'il ne soit pas visible à l'œil, colore en bleu la flamme dégagée par la plaque lorsqu'elle est mise sur le feu. Des expériences analogues sont faites avec succès sur d'autres métaux (argent, étain, plomb, fer), et l'arsenic a été prouvé pénétrer aussi bien ces métaux que le soufre. Boyle s'interroge sur la capacité des corpuscules odorants, loin d'être les plus subtils, à traverser les métaux. Il ne fait aucun doute pour lui qu'ils peuvent se loger dans les pores les plus extérieurs, comme le montre l'odeur longtemps exhalée par les flacons ayant contenu des liqueurs, une fois ces flacons lavés. Il cite des témoignages sur des poignards aux lames richement parfumées, et également sur une montre dont la monture métallique est fortement odorante. Puisque le soufre ou l'arsenic peuvent pénétrer dans les pores de certains métaux, et même de l'argent, pourquoi une matière odorante n'y pénétrerait-elle pas, et ne serait-elle pas assez volatile pour être exhalée, surtout s'il règne dans la poche de la veste où elle est rangée une certaine chaleur ?

Dans le dernier chapitre, il s'interroge sur la porosité du verre, et commence par définir deux types de porosité : (i) la perméabilité, comme l'eau rentre dans une botte, (ii) la corrosion, comme l'eau forte pénètre en la dissolvant la coupe d'argent où elle a été versée. Il constate que l'eau forte, l'eau régale, ou l'huile de vitriol (acide sulfurique), non seulement ne traversent pas le verre, mais ne lui causent aucune altération sensible. Dans certains cas rares, il a été observé que le verre de certains flacons contenant de l'esprit de sel peut apparaître en certains endroits « mangé », aussi fin que du papier, recouvert d'une croûte blanche. Mais d'une manière générale, les substances les plus corrosives se conservent dans le verre sans l'altérer. Boyle note que la distillation de certaines essences dans des récipients de verre fermés, soumis à une forte chaleur, les fait éclater en morceaux, ce qui ne se produirait pas si les essences pouvaient s'insinuer dans les pores du verre et sortir par cette voie. Aucune des expériences menées par Boyle n'a permis de mettre en évidence une quelconque perméabilité du verre. Concernant les vitraux d'église colorés, dont on pourrait penser qu'ils sont pénétrés en profondeur par le pigment, l'examen des fragments de vitraux, suite à l'incendie de la cathédrale Saint Paul de Londres, montre que le pigment se trouve en fine couche à la surface du verre, mais que dessous le verre est incolore.

2.2 Théorie de Musschenbroek héritée de Newton

Musschenbroek, au chapitre II son *Essai de Physique* (1726), intitulé *Du Corps en général, & de ses Propriétés* définit ainsi la porosité :

Les grands Corps doivent leur origine à divers autres petits Corps indivisibles, qui se joignent & s'unissent les uns aux autres. Cette union ou assemblage peut arriver, ou parce que ces Corpuscules viennent à se toucher exactement l'un l'autre par celles de leurs surfaces, qui sont opposées l'une à l'autre [...] & de cette manière ils doivent former une masse solide, sans qu'il reste aucun vide entre eux.

Ou bien ces Corpuscules indivisibles peuvent être de telle figure, ou être entassés les uns sur les autres de telle manière, qu'ils se touchent seulement légèrement en peu d'endroits, & laissent ainsi des vides entre eux. Ces vides sont des étendues sans corps, & on leur donne communément le nom de Pores.

Le développement de la microscopie dans la période de près d'un demi-siècle qui sépare l'essai de Boyle de celui de Musschenbroek, a ouvert de nouvelles fenêtres sur la porosité. Au microscope, on voit les pores dans l'or, l'argent, le cuivre, le plomb et l'étain, « réduits en lames

fort minces ». Les coupes de bois et de végétaux montrent aussi des pores au microscope, ainsi que celles des peaux d'animaux, dont les pores sont plus petits. La transparence des corps, avec le développement du microscope, devient la propriété de presque tous les corps, pourvu qu'ils soient réduits en coupes minces. La transmission de la lumière, qui est un corps, à travers ces coupes minces, ainsi d'ailleurs que celle de la chaleur, prouve l'existence des pores :

La Lumière est un Corps, elle pénètre & s'insinue dans tous les autres Corps minces ; car il n'y a aucun éclat de quelque Corps que ce soit, d'entre ceux que nous connaissons jusqu'à présent, qui n'ait paru transparent, en le considérant à l'aide du Microscope. [...] joignez seulement les doigts de votre main les uns contre les autres, & regardez les le soir à la lumière de la Chandelle, & vous les trouverez alors en quelque manière transparents à chaque côté de leur jonction. La Lumière, qui pénètre à travers ces Corps, est par conséquent une preuve qu'ils ont des pores. Le Feu démontre aussi la même chose. En effet, y a-t-il aucun Corps, soit solide ou liquide, qui ne devienne chaud par le moyen du Feu ? Cet Élément s'insinue donc dans les Corps, & il y pénètre à travers leurs pores.

Musschenbroek prend ensuite un certain nombre d'exemples de pénétration de fluides dans des corps solides, pour l'essentiel analogues à ceux donnés par Boyle. Le mercure pénètre dans les métaux comme de l'eau dans une éponge. Un morceau de marbre posé sur du sable humide, couvert de copeaux de bois de chêne, est traversé par l'humidité, qui fait à sa surface supérieure une tache ineffaçable constituée par la teinture du bois. Musschenbroek considère que les liquides sont également poreux. Ainsi, par exemple, un mélange d'eau et d'huile de vitriol (acide sulfurique) donne lieu à une ébullition suivie d'une diminution de volume du mélange. « *Voilà donc l'eau qui s'insinue en quelque manière dans les pores de l'huile de vitriol* ». Réaumur note une pesanteur spécifique (densité) plus grande du mélange. Pour lui, le peu de pesanteur, et la transparence des liquides, confirment qu'ils sont poreux. A propos du verre, dont Boyle n'est pas parvenu à établir la perméabilité, Musschenbroek nous dit : « *L'Esprit de Salpêtre, fait avec l'Huile de Vitriol, de la manière que nous l'enseigne Monsieur Geoffroy, fameux Chimiste François, de même que le Sel volatil de l'Urine, se font un passage à travers les pores du Verre & s'évaporent, comme je l'ai aussi remarqué moi-même* ».

Tous ces éléments amènent Musschenbroek à considérer que tous les corps connus sont poreux, solides ou liquides, et qu'en l'absence de corps connu sans pore, il n'est pas possible de connaître dans l'absolu le degré de porosité d'un corps à partir de sa densité, problématique que nous avons déjà trouvée chez Boyle. Pour résoudre la difficulté que représente l'opacité de certains corps, comme la feuille de « *papier blanc bien fin* », malgré que « *le diamètre de ses*

pores soit infiniment plus grand que celui des corpuscules de la lumière », Musschenbroek fait appel à « *une certaine vertu qui sort des Corps, & qui repousse divers autres Corps qu'elle rencontre* », ici en l'occurrence le corps de la lumière. Et c'est précisément la disparition de cette vertu, par exemple quand on enduit d'huile la feuille de papier, qui fait que les corpuscules de lumière se mettent à passer à travers ses pores, bien plus grands qu'eux, et que la feuille devient transparente. Musschenbroek développe ensuite une théorie, reprise de Newton, suivant laquelle un corps consiste en l'agrégation de globules élémentaires en globules plus gros, ces globules plus gros s'agrégeant eux-mêmes en globules encore plus gros, et ainsi de suite, jusqu'à atteindre la taille du corps final, à un ordre (le nombre d'étapes de l'agrégation) qui dépend du corps considéré. Pour justifier ce modèle, il compare l'eau à l'or fin, celle-ci étant 19,5 fois plus pesante que celui-là. Il suppose ensuite que l'eau est un ensemble de petits globules sphériques au contact les uns des autres. Le volume du cube circonscrivant la sphère est au volume de celle-ci comme 300 à 157. Si l'eau n'était pas poreuse (en supposant, ce que Musschenbroek ne dit pas, que la matière des globules d'eau a la même densité que celle des corpuscules d'or), on s'attendrait à ce que la densité de l'or, supposé non poreux, soit dans un rapport de 300 à 157 à celle de l'eau. Et si l'or était poreux, ce rapport serait encore inférieur à cette valeur. Il en déduit que l'eau est nécessairement poreuse, les globules d'eau étant eux-mêmes constitués de plus petits globules. D'où l'idée de différents ordres d'agrégation, ordres auxquels on peut associer une porosité sur la base du rapport de volume entre cube et sphère précédemment donné. Reprenant le calcul qu'a fait Newton, il trouve une étendue poreuse quinze fois plus grande au quatrième ordre, et soixante-trois fois plus grande au sixième ordre. Newton, nous l'avons vu, fait en effet l'hypothèse que les corps ne diffèrent entre eux que par l'arrangement de leur matière, et non à travers une combinaison de matières différentes dès l'origine. La hiérarchie des grandeurs des pores dans cette représentation, avec autant de grandeurs que d'ordres, est illustrée par l'observation microscopique du liège, ou de l'éponge, l'utilisation d'un microscope plus puissant permettant toujours de découvrir de nouveaux pores, plus petits. Et pour illustrer la variété des structures qui peuvent être obtenues à un certain ordre donné, Musschenbroek donne l'exemple de l'eau, et des différentes formes qu'elle prend dans l'atmosphère :

Les parties d'un même ordre, entassées de différentes manières les unes sur les autres, produisent des Corps d'une structure extrêmement différente. Nous nous contenterons de faire voir cela dans l'eau, qui est composée de parties simples ; car il ne s'est jamais trouvé aucun Chimiste, qui ait pu tirer d'une eau bien pure autre chose que de l'eau, à moins qu'elle ne se changeât en terre. Cette eau,

rassemblée dans un vaisseau , nous parait sous la forme d'un liquide pesant : mais lorsqu'elle est sur le feu, elle s'exhale dans l'air, reçoit la forme de Vapeurs, produit le Brouillard, & s'élevant encore plus haut elle se change en Nuée ; ses petites parties venant à se joindre un peu, & à tomber en bas, forment une petite pluie : mais lorsqu'un plus grand nombre des parties de la Nuée se réunissent, elle produisent de plus grosses gouttes de pluie : le Brouillard se rassemblant en Hiver autour des Arbres, il s'y gèle, y reste suspendu, & fait que ces mêmes Arbres paraissent tout couverts de Givre. La petite pluie tombant aussi en Hiver, & se gelant dans sa chute, se change en Neige : les plus grosses gouttes de pluie sont changées en Grêle par le froid. Lorsque le Givre, la Neige, & la Grêle se fondent, elles se changent de nouveau en Eau, & redeviennent de cette manière ce qu'elles avoient été auparavant. Voilà donc un des Corps les plus simples qui est sujet à tous ces grands changements de figure, qui ne sont cependant causés que par les différents arrangements des parties.

2.3 Expériences de Nollet sur la porosité

Nollet, dans ses *Leçons de physique expérimentale* (1743), consacre un chapitre à la porosité. Les pores dans les corps ne sont en général pas vides, ainsi que le montrent les nombreuses bulles d'air libérées par l'éponge pressée dans l'eau. Le séchage des matières humides, résultant de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores, le montre également. Mais ces corpuscules étrangers, eau, air ou autre, ne remplissent que les plus grands pores. Les pores plus fins sont réservés à la matière du feu, ou à celle de la lumière, dont on sait qu'elles traversent des corps impénétrables à l'air ou à l'eau. Cette idée se retrouve à la même époque chez d'autres auteurs, comme Béraud (1748), qui compte également au nombre des matières subtiles occupant les pores fins les matières électrique et magnétique. Et il existe certainement, bien que cela ne soit pas démontrable par l'expérience, des pores vraiment vides, dénués de toute matière. Nollet donne la définition générale suivante :

En exceptant donc seulement les parties simples & primordiales des corps, nous établissons comme une proposition générale, que tout ce qui est composé de parties matérielles est poreux, les corps durs comme les liqueurs, ceux qui sont organisés comme ceux qui ne le sont pas : & s'il y a quelque différence dans les uns & dans les autres, ce n'est que par la grandeur, par le nombre, par la figure ou par l'arrangement des pores.

Il décrit ensuite ses expériences. En premier lieu celle du vase de bois rempli d'eau, dont le fond fait de l'ordre du centimètre d'épaisseur, et au-dessous duquel se place un tube de verre qu'on vide par pompage. L'eau du vase passe à travers le fond et tombe par gouttes dans le tube. Cela s'explique par le fait que les fibres du bois sont non jointives. Il applique ce résultat

aux problèmes de fissuration du bois des fenêtres suite aux inhomogénéités d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur. Citons, à propos de la porosité du bois, cet extrait tiré de l'article PORES de l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751) :

PORES du bois, (Science microsc.) comme le liège & le sapin sont les bois les plus légers, ce sont aussi ceux qui sont les plus propres à découvrir au microscope le nombre prodigieux, la figure & la disposition de leurs pores, en coupant ces bois en morceaux aussi minces qu'il est possible. M. Hooek, (Micrograph. 114.) a observé que dans un morceau de liège, les vaisseaux de l'air, ceux de la sève, & les pores du bois, sont merveilleux dans leur figure, leur nombre, & leur disposition, comme on le voit clairement lorsqu'on en coupe des morceaux aussi minces qu'il est possible, & qu'on les présente à la vue. Le sapin & le liège sont les plus propres à cette observation, mais les autres espèces de bois peuvent être disposées à cet examen, quoiqu'avec un peu plus de peine. Dans un morceau de liège de la longueur de la dix-huitième partie d'un pouce, on a compté soixante cellules en ligne droite, d'où il suit qu'il en a 1080 dans la longueur d'un pouce, un million 166 mille 400 dans un pouce carré, & 1259 millions 712 mille dans un pouce cubique.

Dans sa deuxième expérience, Nollet remplace le vase de bois par un flacon de cristal, le fond étant constitué par une peau de buffle, et l'eau par du mercure, pour constater une pluie d'argent (petits globules de mercure) dans le tube. Il applique le résultat à la transpiration du corps humain, en signalant que, selon Sanctorius, on élimine par la transpiration les cinq huitièmes de ce qu'on mange et boit. La troisième expérience consiste à plonger un œuf dans un verre d'eau claire, puis à pomper l'air au-dessus de l'eau. On voit la surface de l'œuf se couvrir de bulles d'air, qui se détachent peu à peu pour gagner la surface de l'eau. A certains endroits, il se forme de petits jets d'air constitués par une suite continuelle de globules. Ce phénomène montre la porosité de la coquille de l'œuf, qui, en l'absence de pompage, se vide en peu de jours de sa substance, pour se remplir d'air extérieur, d'où la recommandation de Réaumur de couvrir la coquille des œufs d'un enduit imperméable pour les conserver longtemps (cinq ou six mois !). L'expérience suivante consiste à faire, avec une liqueur claire et incolore formée de vinaigre distillé et de litarge (oxyde de plomb), un dessin sur une feuille de papier. Puis cette feuille parfaitement blanche et sans aucune trace d'écriture, une fois séchée, est insérée entre les premières pages d'un livre épais de 400 ou 500 feuilles. Après quoi la dernière feuille du livre est enduite d'une autre liqueur incolore (orpiment : trisulfure d'arsenic, mercure, germanium, antimoine ; chaux vive ; eau commune). On tient ensuite le livre fermé trois ou quatre minutes, puis on retire la feuille de papier insérée en début de livre, et la forme qu'on avait dessinée en brun noir apparaît en brun-noir, aucune autre marque semblable n'étant visible dans le reste du

livre. C'est le mélange de la liqueur qui a servi à faire le dessin (à l'encre sympathique donc), et de la liqueur dont on a enduit la dernière page, qui a diffusé à travers les centaines de feuilles du livre, qui prend une couleur que n'avait auparavant aucune des deux liqueurs.

Nollet, comme Musschenbroek, note que la comparaison entre les densités de deux corps ne nous informe que sur leur porosité relative. « *Elle ne nous dit pas que dans l'un des deux, il y a justement telle ou telle quantité de parties solides, ce qui nous ferait connaître évidemment de combien il est poreux. Le vrai moyen d'en être instruit, serait d'avoir une matière de comparaison qui fût toute solide, en qui la grandeur & le poids fussent absolument synonymes* ». On remarque que Nollet utilise le mot « *solide* » pour caractériser un corps parfaitement compact, sans porosité. Il note que la porosité n'est pas due qu'à la taille des pores, mais dépend aussi de leur nombre. Le liège arrête l'évaporation des liqueurs, le bois beaucoup moins. Or, même comprimé, le liège est moins dense que le bois. « *Il est donc plus que vraisemblable que si dans l'un des deux la somme des vides est plus grande, c'est moins par la grandeur que par le nombre des pores* ». On pourrait expliquer de la même façon pourquoi l'eau régale (mélange d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique), qui dissout l'or, ne pénètre pas dans l'argent, alors que celui-ci est plus léger, et donc plus poreux, que celui-là, en supposant que les pores de l'argent sont plus petits, mais en un nombre tel que l'argent est globalement plus léger. Mais si l'on ajoute que « *l'eau forte ordinaire [acide nitrique], qui divise l'argent & la plupart des autres métaux, ne donne aucune atteinte à l'or ; il faut avouer que la grandeur respective des pores devient une raison bien faible ; car pourquoi ce qui peut s'introduire dans une moindre ouverture, n'en peut-il pas pénétrer une plus grande?* ». Il faut donc supposer « *qu'une particule solide pour se placer dans un de ces petits vides, ou pour passer de l'un à l'autre, doit avoir non seulement une grandeur proportionnée, mais aussi une figure convenable ; & que l'une de ces deux conditions venant à manquer, l'autre peut fort bien ne pas suffire* ». Mais cela reste une conjecture. Hartsoeker (1708) résout différemment la difficulté, que l'on pourrait résumer ainsi : l'esprit de nitre (ou eau forte) attaque l'argent, pas l'or ; l'eau régale (mélange d'esprit de nitre et d'esprit de sel marin) attaque l'or, pas l'argent. Il donne l'explication suivante, basée sur l'idée d'une affinité spontanée entre les parcelles des deux esprits :

La présence de l'esprit de sel marin empêche donc l'esprit de Nitre de dissoudre l'Argent, parce que deux parcelles de ces deux esprits qui s'unissent à la première occasion par leur disposition naturelle, ne sauraient entrer dans les pores trop étroits de l'Argent. Au contraire, la présence de l'esprit de

Nitre, bien loin d'empêcher l'esprit de sel marin de dissoudre l'Or, vient à son secours, parce que deux parcelles de ces esprits savoir une de l'esprit de sel marin & une de l'esprit de Nitre , remplissent exactement un des pores de l'Or.

Ainsi, l'eau régale ne dissout pas l'argent, car une parcelle de l'esprit de nitre, s'unissant tout de suite dans le mélange formant l'eau régale à une parcelle de l'esprit de sel, empêche cette dernière, qui toute seule dissoudrait l'argent, de pénétrer dans les pores de l'argent, plus petits que ceux de l'or. Ces débats montrent à quel point la question de la taille des pores est dans la première moitié du XVIII^{ème} siècle considérée comme un déterminant essentiel de l'action chimique d'un corps sur un autre.

On retrouve chez Béraud (1748) un questionnement analogue aux précédents à propos de la porosité de l'aimant, du fer et de l'or, l'or étant plus pesant sur le fer, et le fer que l'aimant. Ceci suggère que « *les grands pores de l'Aimant [sont] ou plus larges ou en plus grand nombre que ceux du fer, & ceux du fer de même ou plus larges ou en plus grand nombre que ceux de l'or* ». Mais les effluves magnétiques et électriques pénètrent l'or plus facilement que le fer, et le fer plus facilement que l'aimant : « *ne peut-il pas se faire que les petits pores de l'Aimant, ces conduits étroits qui ne donnent entrée qu'à la matière éthérée, soient ou plus serrés ou en plus petit nombre que ceux du fer, & ceux du fer pareillement ou en plus petit nombre ou plus serrés que ceux de l'or?* ». Une combinaison de grands et de petits pores, dans des proportions adaptées, permet ainsi d'accommoder à la fois les contraintes fournies par la densité, et celles résultant des divers degrés de pénétration requis pour les matières subtiles.

Le père jésuite Regnault, dans ses intéressants *Entretiens physiques d'Ariste et d'Eudoxe*, met dans la bouche de l'étudiant Ariste la question suivante à l'adresse d'Eudoxe, le cartésien :

Quand on voit tout l'Univers inondé de matière subtile, & que l'on est convaincu qu'elle en est comme l'âme ; il faut bien, à quelque prix que ce soit, lui trouver, dans une extrême porosité, des passages libres, pour aller faire sentir partout son efficace, Je gagerais, Eudoxe, que vous voyez clairement jusques dans la matière subtile, chaque particule comme criblée, & percée en cent millions d'endroits au moins. Mais parlons franchement : est-il vraisemblable que tous les corps aient leurs pores ?

Et Eudoxe, déniait à la matière subtile toute porosité, mais accordant en revanche des pores à tous les corps sensibles, de lui répondre :

Il n'est point probable que tous les corps insensibles en aient ; ni mes yeux, ni ma raison, n'en voient dans la matière subtile. Les parcelles de pareils corpuscules ont si peu de consistance, sont si minces, que la moindre force doit, ce semble, les unir immédiatement. Mais comme les particules de tous les corps sensibles ont plus de solidité, & qu'elles ont des figures différentes, rondes, carrées, &c. il est probable qu'ils ont des interstices ou des pores. Que dis-je, probable ? C'est un fait certain, que la raison nous apprend de concert avec l'expérience.

Suit une longue liste d'arguments fournis par Eudoxe, la plupart déjà évoqués dans les lignes qui précèdent : la compressibilité de l'ivoire qui montre sa porosité, la faible densité de l'eau par rapport à celle du mercure indiquant qu'elle n'occupe pas plus qu'une petite fraction de l'espace qu'elle semble occuper, la transparence des cristaux, des rubis, des diamants, montrant qu'ils donnent passage à la lumière, qui est un corps (car elle peut blesser les yeux), l'allègement progressif de l'œuf, la transpiration du corps, le soufre qui traverse les parois de métal, le mercure qui traverse le cuivre, les métaux que la chaleur met en fusion, ce qui montre que la matière ignée les traverse, l'action des esprits (les acides) sur les métaux, l'observation microscopique des corps etc...

3. Atmosphères des corps

3.1 L'atmosphère des corps solides selon Boyle

Boyle, dans son essai de 1669 sur *les atmosphères des corps cohérents* (« *consistent bodies* »), s'attache à prouver que des corps durs et lourds peuvent émettre des vapeurs. Il remarque en premier lieu que des corps électriques tels que l'ambre, la colophane, le soufre, quand on les frotte, se divisent en nombreux corpuscules. L'explication communément admise de l'attraction exercée par des corps électriques est l'émission de particules matérielles. On sait que les fruits perdent du poids de jour en jour. Il existe de multiples exemples de l'exhalaison continuelle de vapeurs par les substances animales et végétales. Si l'on montre que des substances froides, ou denses, ou dures, peuvent également émettre des vapeurs, il deviendra probable que tous les corps sont la source d'une atmosphère. Les œufs, nous l'avons vu, s'allègent. La glace d'eau, exposée à un air glacé, s'évapore et perd du poids. À l'exception, de l'or, du verre, et de quelques autres substances, la plupart des corps solides se dissipent sous l'effet du feu, émettant des vapeurs toxiques. L'aimant opère par les particules magnétiques qu'il émet. L'aimant est un corps dense, certains aimants pesant deux fois plus que des silex ou des pierres de même

volume. Les tailleurs de pierre disent que le marbre noir, et d'autres pierres lourdes, dégagent une odeur quand on les polit. Or il n'y a pas d'odeur sans diffusion d'exhalaisons corporelles. Une météorite exhale une forte odeur de soufre quand on la frotte. Certains minéraux, aussi lourds que du métal, émettent des exhalaisons d'une senteur insupportable. Des corps d'une extrême dureté, dont on peut faire naître l'étincelle par le frottement du silex, et d'une texture si serrée que ni l'esprit de nitre, ni l'esprit de sel, ne les attaquent, comme le cristal de roche ou les diamants, sont entourés d'une atmosphère électrique. Des corps durs et denses comme le fer, ou la pyrite, dégagent sous l'effet de l'abrasion des odeurs fortes, qui ne sont autre chose que des effluves matérielles. Le verre résiste au feu, et cependant quand on frotte deux morceaux de verre l'un contre l'autre, il s'en dégage une odeur agressive, témoignant de la présence d'une atmosphère.

Le soleil, chauffant les corps, les dote d'une atmosphère. Ainsi, un grand morceau d'ambre, qui normalement n'attire les corps légers que s'il est frotté, acquiert la vertu attractive quand on le place au soleil. Un morceau de verre approché du feu devient pareillement attractif. Et Boyle de conclure : « *Il semble donc en résulter que de nombreux corps cohérents, qu'ils soient animaux, végétaux ou minéraux, peuvent émettre des effluves ; et que même ceux qui sont solides peuvent avoir également leurs petites atmosphères* ». Une bonne balance constitue le moyen d'examiner l'exhalaison des corps inanimés. Si un corps perd du poids, comme le morceau de glace, ou le morceau de bois, on peut être sûr qu'il exhale, mais s'il n'en perd pas, on ne peut être certain qu'il n'exhale pas. Ainsi, l'aimant, malgré son atmosphère d'effluves magnétiques, ou le morceau d'ambre, malgré son atmosphère électrique, ne perdent pas de poids. Peut-être le poids décroît-il, mais sur des temps très longs pour des corps dont les effluves sont subtiles (magnétique, électrique). Mais suivre sur le long terme de poids des corps par le moyen de la balance est difficile, car il faudrait disposer de corps de référence parfaitement fixés, sans aucune variation de poids, pour la comparaison :

Et aucun homme, je pense, n'a encore expérimenté, si le verre, et même l'or, peuvent sur les longues durées perdre leur poids ; ce qui, au cas où ils le feraient, ne serait pas facile à découvrir, à moins d'avoir des corps parfaitement fixés ; auxquels les comparant nous pourrions être mieux aidés qu'en utilisant des poids en laiton, ou similaires, qui, étant eux-mêmes moins fixés, perdront plus que l'or ou le verre.

Ainsi, pour Boyle, non seulement la quasi-totalité des corps sont poreux, mais encore tous les corps, jusqu'aux plus durs, possèdent une atmosphère. Cette atmosphère se forme, soit par exhalaison de matière commune, comme l'eau ou l'air, ou encore des matières odoriférantes, soit par circulation d'effluves de matières subtiles.

3.2 La matière aérienne de Mariotte

À la même époque, Mariotte mène des expériences sur la dissolution de l'air dans l'eau, et sur les volumes d'air relâchés par l'eau dans laquelle il est dissout. Dans son *Second essai de la nature de l'air* (1679), il mène des expériences sur la façon dont l'air se comporte dans l'eau. « *L'air enfermé dans l'eau en petite quantité y prend une forme sphérique par la force de son ressort, qui pousse l'eau également de tous côtés* ». Ainsi, l'air qui suit une balle de plomb qu'on laisse tomber dans l'eau remonte en petites boules rondes. Il observe que l'eau ne sort pas d'une bouteille renversée dont le goulot fait moins de 4 lignes (à peu près un centimètre). Il attribue ce phénomène au fait que l'air ne peut se diviser en bulles qui aient moins de 4 lignes de largeur, les bulles qui se forment occupant tout le goulot et ne laissant pas l'air sortir. « *Mais quand le goulot est large, l'eau tombe, parce que l'air peut entrer en grosses bulles d'un côté, pendant que l'eau coule de l'autre.* » Pareillement, l'air ne sort pas d'une bouteille pleine d'air renversée et placée au fond de l'eau si le goulot fait moins de 4 lignes. Si l'on remplace l'eau par du vin purifié plus léger que l'eau, le vin sort, ce qui montre que le vin et l'eau se divisent facilement en petites parcelles (plus petites que 4 lignes), alors que l'air se divise difficilement.

L'air s'insinue dans l'eau, et les autres liqueurs, et s'y dissout. Quand, dans une fiole remplie d'une eau qu'on a laissé bouillir une heure pour la purger de son air, on introduit une bulle d'air, puis qu'on renverse la fiole et la fait tremper dans un verre d'eau trois ou quatre jours, la totalité de l'air introduit disparaît. L'introduction successive de plusieurs bulles montre que l'air met de plus en plus de temps à disparaître, suggérant que l'eau atteint le maximum de l'air qu'elle peut dissoudre. Mariotte interprète ainsi le résultat de son expérience :

Cet effet se fait apparemment par deux causes. La première est le pressement de l'air de l'Atmosphère, qui pouvant élever l'eau de la bouteille jusqu'à trente-deux pieds, presse la petite bulle, ce qui lui aide à s'insinuer dans l'eau. La seconde est une disposition qui est en l'eau à dissoudre de certains corps, comme les sels, jusques à une certaine quantité ; laquelle disposition peut aussi s'étendre à dissoudre & à absorber une certaine portion d'air, & non davantage.

Si l'on remplace l'eau bouillie par de l'eau de rivière, il faut plus de quinze jours pour résorber la bulle, ce qui montre qu'il y a de l'air dissout dans l'eau de la rivière. Mais « *il ne faut pas croire que l'air dissous & mêlé dans l'eau y conserve une étendue égale à celle de celui que nous respirons, car il y est beaucoup plus condensé, & en cet état il ne doit pas être appelé Air, mais Matière aérienne. Je prouve cet effet par les expériences suivantes* ». Mariotte utilise un vaisseau contenant un bain d'huile. Il immerge dans l'huile un verre renversé, en partie couché, de façon qu'il soit rempli d'huile, puis le redresse en sorte que la partie fermée du haut dépasse de quelques lignes la surface du bain d'huile. Il fait brûler une chandelle au-dessous du vaisseau, en vis-à-vis du petit verre, et vérifie qu'aucun air n'apparaît au sommet de l'huile dans le verre. Puis, ayant laissé refroidir l'huile, il dépose une goutte d'eau au fond du bain, puis la recouvre du petit verre plein d'huile. En chauffant la goutte d'eau à l'aide d'une chandelle placée sous le vaisseau, on constate que l'air s'échappe par bulles et vient remplir, en haut du petit verre, un volume 8 à 10 fois supérieur au volume de la goutte (après refroidissement) : « *d'où je tire une conséquence, que cet air n'était pas selon cette dilatation dans la goutte d'eau, mais qu'il y occupait beaucoup moins de place* ». Mariotte vérifie avec rigueur que l'air ne peut pas provenir de l'huile, et conclut que l'air sort bien de la goutte d'eau. Quand il chauffe plus fort, il observe des fulminations qui soulèvent le petit verre.

Or la matière qui fait ces fulminations est dans la goutte d'eau, puisque l'huile seule n'en donnait point, & elle est apparemment différente de celle qui produit l'air peu à peu : car quoiqu'elle écarte presque toute l'huile du petit verre, & qu'elle occupe pendant un moment la plupart de sa capacité, incontinent après elle se réduit comme à rien, & n'augmente pas sensiblement la quantité de l'air qui est au haut du petit verre ; & par conséquent c'est une matière qui se dilate beaucoup plus que l'air, lorsqu'elle a atteint un certain degré de chaleur, mais elle ne se dilate point à une médiocre chaleur, & ce peut être quelque chose de semblable à ce qui est dans le sel de tartre, & dans le salpêtre qui fait fulminer ces matières, lors qu'étant bien mêlées avec du soufre, on les laisse échauffer peu à peu ; car ce mélange arrive enfin à un degré de chaleur tel que se dilatant étrangement tout à coup, tout le composé se dissipe, & fait un bruit qui blesse l'ouïe.

Dans une autre expérience, Mariotte renverse un entonnoir de verre qu'il immerge en totalité dans un vaisseau rempli d'eau. Puis il renverse une bouteille remplie d'eau dont il introduit le goulot dans l'entonnoir. Il pose l'ensemble sur un fourneau. A faible chaleur, l'air s'accumule au sommet de la bouteille pendant environ un quart d'heure, mais après, les bulles cessent de se former, la matière aérienne contenue dans l'eau étant épuisée. La chaleur augmentant, il se

fait des fulminations épisodiques projetant l'eau en haut de la bouteille, sans que l'air soit augmentée. « [...] d'où l'on peut juger que cette matière fulminante procède des sels qui sont dissous dans l'eau, & n'est pas la même que celle qui se dilate à une médiocre chaleur, & qui a toutes les propriétés de l'air ; & c'est apparemment cette matière qui cause la continuation du bouillonnement de l'eau sur un grand feu, jusqu'à ce qu'elle soit toute évaporée ». Le bouillonnement et les fulminations, dans cette expérience et la précédente sont ainsi dus au fait que l'eau bout et cette « matière qui se dilate beaucoup plus que l'air, lorsqu'elle a atteint un certain degré de chaleur » est à l'évidence l'eau en train de se vaporiser. Pour certains, dit Mariotte, le bouillonnement procède du feu, des esprits ignés traversant les vaisseaux de l'eau, mais, note-t-il, il n'y a aucune matière inflammable dans la bouteille, l'eau restant parfaitement nette.

Mariotte énumère trois causes par lesquelles la matière aérienne dissoute dans l'eau peut en sortir : (i) tout d'abord par la chaleur, ainsi que les expériences précédemment relatées le montrent ; (ii) par l'affaiblissement du ressort de l'air pressant l'eau, comme on l'observe dans la machine pneumatique quand on fait le vide : des bulles d'air s'élèvent dès qu'on a réduit la quantité d'air à sa moitié, ce qui montre que l'ébullition de l'eau ne procède pas d'une matière ignée ; (iii) par la gelée, qui fait que les particules d'eau s'accrochent les unes aux autres et expulsent l'air qui se trouve entre elles. Il donne l'exemple d'un verre d'eau exposé à la gelée : on y voit apparaître de très nombreuses petites bulles d'air qui font se fendre la glace. Il mentionne également une expérience lors de laquelle on fait geler de l'eau contenue dans un canon culassé aux deux bouts, et où le canon explose sous la poussée, dont il pense que c'est celle de la matière aérienne libérée par le gel. Parlant de l'effort exercé par l'eau qui gèle dans le canon, Mariotte écrit :

L'eau qui se gèle dans un verre ne peut pas faire un si grand effort, par ce qu'à mesure que la matière aérienne se dilate en air, une partie de cet air s'élève au-dessus de l'eau & passe par une petite ouverture qui demeure en la surface supérieure de la glace, & l'autre partie qui s'attache en petites bulles contre le verre ou contre la glace, fait sortir par la même ouverture une partie de l'eau, qui se répand sur la glace qui est formée à l'entour, ce qui se reconnaît par l'élévation de la glace, proche de cette ouverture ; mais dans le canon la matière aérienne y étant demeurée toute entière & toute l'eau aussi, l'effort devait être beaucoup plus grand.

Ainsi, c'est clairement à la matière aérienne libérée que Mariotte attribue la dilatation qui fait éclater le canon, et provoque l'élévation de la glace dans le verre.

Cette question de l'expulsion de la matière aérienne par l'eau qui gèle est traitée par Mairan dans sa *Dissertation sur la glace* (1749), un demi-siècle plus tard. Il mentionne qu'il sort de l'eau qui gèle une grande quantité de petites bulles d'air, et qu'il se fait comme un bouillonnement à l'approche de la congélation. « *Cet air divisé auparavant en une infinité de petites parcelles répandues uniformément dans le liquide, venant à se rassembler par leur rencontre, & à se trouver en cet état plus comprimé vers les endroits où la congélation commence, que du côté où elle est plus retardée, s'échappe de ce côté-là, s'y assemble de nouveau, & y forme des bulles si visibles, qu'elles ont quelquefois jusqu'à 2 ou 3 lignes [un demi-centimètre] de diamètre* ». Quand la congélation est prompte, il sort très peu d'air de l'eau, mais les bulles sont grosses. Quand elle est lente, il sort de nombreuses petites bulles. Mairan note que le volume de l'eau diminue quand on la refroidit, mais qu'il augmente brutalement à la congélation, la densité diminuant d'autant. Il identifie trois causes possibles à l'augmentation de volume de l'eau qui se glace, l'une qui est celle invoquée par Mariotte pour expliquer l'éclatement du canon rempli d'eau : « *les bulles d'air qui s'assemblent dans l'eau pendant la congélation* », les deux autres concernant la structuration des parties intégrantes de l'eau dans sa transformation en glace. À propos de l'air dissout dans l'eau, ce que Mariotte appelle la « *matière aérienne* », Mairan explique que s'il est divisé en petites parcelles occupant les interstices de l'eau, il est sans ressort, comme un brin de laine isolé. S'il s'assemble en grosses bulles, comme les brins de laine s'assemblant en pelote, on peut comprendre qu'il acquière ainsi du ressort, et occupe donc plus d'espace. « *Dans le premier cas on n'a quasi d'autre volume que celui de la matière propre de la laine ; dans le second il y faut ajouter les vides & les intervalles que les brins de laine irrégulièrement assemblés & tortillés laissent entre eux* ». Mairan écrit un peu plus loin : « *Nous dirons de l'air qui est ainsi contenu dans un liquide, ou de quelque autre manière que ce soit, différente de la forme sous laquelle nous le respirons, & comme délayé dans ce liquide, qu'il y est intimement mêlé, & de l'autre, de l'air ordinaire, que c'est de l'air en masse* ». Il fait référence aux résultats de Mariotte précédemment exposés :

Il résulte d'une expérience de M. Mariotte, rapportée dans son Essai de la nature de l'air, qu'on peut faire sortir d'une goutte d'eau par la chaleur, une quantité d'air égale à 8 ou 10 fois le volume de la goutte. Que serait-ce si cet air y avait été sous sa forme ordinaire & élastique, comme il est dans un ballon! Le liquide aurait-il résisté à son effort! Il y a donc infiniment plus d'apparence qu'il y était

intimement mêlé, & de la même manière qu'il s'y insinue de nouveau, & qu'il s'y dissout, après qu'on l'en a purgée.

3.3 Les expériences de distillation de Nollet

Nollet réalise une expérience de distillation de diverses substances dans laquelle la cornue où est opérée la distillation rejette la matière produite dans un vaisseau rempli d'eau surmonté d'une masse d'air équilibrée par la pression de l'atmosphère à l'extérieur du vaisseau (expérience XIX du tome troisième de ses *Leçons de physique expérimentale*, 1743). Ainsi, suivant que la distillation rejette de la matière ou absorbe de l'air, le niveau de l'eau respectivement descend ou monte, donnant la mesure de la quantité de matière ou d'air rejetée ou absorbée. Voici ce qu'il en dit :

Par des procédés à peu près semblables à celui que je viens de décrire, M. Hales ayant éprouvé toutes sortes de matières animales, végétales & minérales, solides & liquides, a trouvé, par exemple, qu'un pouce cubique de sang de cochon, distillé jusqu'aux scories sèches, produisait 33 pouces cubiques d'air.

Que la moitié d'un pouce cubique de la pointe des cornes d'un daim, donnait 117 pouces cubiques d'air, ce qui faisait un volume 234 fois aussi grand que celui de la matière distillée.

Que d'un demi-pouce cubique de bois de chêne, il en sortait 128 pouces cubiques d'air.

Que d'un pouce cubique de terre vierge, il vint à la distillation 43 fois autant d'air.

[...]

De pareils facteurs de dilatation sont étonnants, ainsi que l'exprime Nollet :

Ce que l'on a de la peine à comprendre, c'est qu'il puisse se loger une si grande quantité d'air dans certaines matières, sans qu'il y paraisse comprimé, autant qu'il faudrait qu'il le fût, si l'on voulait le réduire à un aussi petit volume, lorsqu'une fois il est dégagé ; car quelle force ne faudrait-il pas pour restreindre dans l'espace d'un demi-pouce cubique 234 fois autant d'air semblable à celui de l'atmosphère ?

Ce phénomène nous apprend que l'air intimement mêlé à d'autres matières, y est dans un état tout différent de celui où nous le voyons lorsqu'il en est dégagé ; quel est donc cet état de l'air dans l'intérieur des corps ? & comment en reçoit-il un autre lorsqu'il se dégage ?

Nollet reprend comme une possibilité pertinente l'analogie devenue alors classique avec le brin de laine représentant la particule d'air à l'état dissout, et la pelote de laine remplie d'interstices

représentant le globule d'air élastique. Mais il propose une autre explication. Pour lui, l'air se trouve dans les corps sous deux états différents : (i) Les grands pores contiennent l'air élastique, et celui-ci est relâché quand l'air extérieur cesse de presser, comme lorsqu'on fait le vide dans la machine pneumatique. Pour dégager cet air élastique, il n'y a que deux moyens : la chaleur ou le vide. Le ressort de l'air d'autant plus grand que son volume est plus grand, et l'extraction d'autant plus facile que les pores sont plus ouverts jusqu'à la surface. (ii) Les petits pores contiennent un air plus divisé, la matière environnante ayant plus de cohérence qu'il n'a d'élasticité. Il est plus difficile à extraire, car il faut diviser le corps, et on ne peut compter sur le ressort de l'air contenu dans les pores pour aider à cette extraction. Concernant l'air non élastique contenu dans les petits pores, Nollet imagine qu'il peut s'agir d'un air tellement comprimé qu'il a atteint sa limite de compression et est devenu dur, perdant de ce fait toute son élasticité. Et c'est, selon lui, pour cette raison que « *cet air extrait des corps prend un volume si considérable qu'il excède deux ou trois cents fois celui dont il faisait partie* ». Il pense que la cohérence des parties est suffisante pour résister à la réaction de ces globules d'air comprimés à l'extrême, dont il n'explique cependant pas la formation. Mais il ajoute une réflexion absolument essentielle :

Une raison que l'on peut ajouter encore pour expliquer cette prodigieuse extension de l'air extrait, c'est que cet air n'est point pur ; c'est un fluide composé, qui tient beaucoup des matières d'où il sort ; je ne veux pour preuves que les effets dont il est capable : celui que l'on tire de la pâte fermentée, des fruits, & de la plupart des végétaux, éteint le feu, suffoque les animaux, & se fait sentir par une odeur pénétrante ; il est donc évident que cet air est chargé d'une vapeur abondante, qui fait partie de son volume, & l'on sait d'ailleurs que toutes les substances qui s'évaporent, s'étendent prodigieusement ; ainsi les cent vingt-huit pouces cubiques d'air qui sortent d'un demi-pouce cubique de bois de chêne, se réduiraient vraisemblablement à une quantité bien moins grande, si l'on en séparait ce qu'ils contiennent d'étranger.

Nous sommes ainsi partis de la théorie de la matière aérienne de Mariotte, qui montre que l'air dissout dans l'eau sous la forme de cette matière, lorsqu'il est relâché, occupe un volume dix fois supérieur à celui de l'eau dont il est extrait, puis, suivant Nollet dans ses expériences de distillation, avons vu que le volume de l'air produit par la distillation de substances terreuses, végétales, ou animales (riches en eau), peut être plusieurs centaines de fois supérieur à celui des substances dont il est extrait. Enfin, Nollet a remarqué qu'une partie seulement des vapeurs qui s'échappent des substances distillées est de l'air, le reste consistant en vapeurs diverses. Dans l'esprit de l'article ATMOSPHERE DES CORPS

TERRESTRES du dictionnaire de physique, dont le contenu a été présenté dans l'introduction, on peut appeler « atmosphère d'air » d'une masse d'eau le volume d'air dégagé par cette masse lorsqu'elle est chauffée, ainsi que l'a mesuré Mariotte. Quant aux corps odoriférants et aux corps animaux et végétaux, cités dans le même article comme ayant des atmosphères particulières, ce sont précisément ces corps, qui libèrent de très grands volumes d'air et de vapeurs mélangés, qu'ont étudié Hales et Nollet.

3.4 Atmosphère des corps liquides et formation de la glace selon Perrault

À l'atmosphère commune, et à l'atmosphère particulière des corps, correspondent respectivement des corpuscules communs et des corpuscules propres. Selon Perrault (1680) :

[...] généralement tous les corps souffrent une évaporation continuelle de leur portion la plus subtile & la plus volatile, qui est ce dont presque tout la partie grossière de l'air est composée, & qu'en même temps les corps reçoivent aussi quelque chose de cette masse d'évaporation dont ils se remplissent, n'admettant ordinairement que ce qui est semblable à leur nature, & recevant néanmoins quelquefois des substances différentes de la leur.

Cette conception, qui suppose un échange permanent de matière volatile entre un corps et son environnement d'air, correspond précisément à l'idée d'une atmosphère de ce corps, elle-même en échange permanent avec les atmosphères des autres corps. De ces portions subtiles et volatiles, Perrault dit qu'elles constituent « *ce dont presque toute la partie grossière de l'air est composée* », ce qui revient à dire que l'air grossier est pour l'essentiel la réunion des atmosphères particulières des corps qui se mélangent dans l'atmosphère, ce mélange fournissant aux corps la matière nécessaire à leur rechargement en matière volatile, ceux-ci choisissant « *ce qui est semblable à leur nature* ». À l'appui de cette théorie, la durée longue d'exhalaison de certains corps odoriférants suggère que ces corps reçoivent une matière approchante de celle qu'ils exhalent, chaque corps choisissant dans la masse des corpuscules communs ceux qui lui sont propres. D'autre part, on constate que certains corps « *deviennent plus pesants & contractent d'autres qualités qui ne peuvent être attribuées qu'à l'introduction de quelque nouvelle substance qu'ils reçoivent de l'air* ». L'évaporation est causée par la chaleur, ou la fusion. Et Perrault de faire l'hypothèse suivante :

[...] *les corps sont liquides par l'interposition des parties volatiles, que j'appelle Corpuscules Communs, qui coulent & passent au travers du corps, les uns sortant pour s'évaporer, & les autres entrant pour prendre la place de ceux qui sortent. Car le flux continuel de ces parties volatiles empêche, que les particules plus grossières ne se puissent appliquer par leurs faces plates ; quoiqu'elles soient poussées et comprimées pour cet effet, par la portion subtile de l'air, mais elles glissent les unes sur les autres de même que les pieds feraient sur un plancher qui serait semé de poix; ou de même que l'on fait aisément glisser de grosses pierres sur des rouleaux de bois. Je dis encore, que les corps cessent d'être liquides par les causes qui font cesser ce flux. Car alors la pesanteur de la portion subtile de l'air, comprime les parties grossières, & procure l'application des faces plates.*

Autrement dit, c'est la circulation permanente causée par l'évaporation et l'entrée de corpuscules échangés avec l'atmosphère qui maintient les corps dans leur état de liquidité, en empêchant les faces plates d'adhérer les unes aux autres. Que ce flux cesse, la pesanteur de l'air subtil comprime les parties grossières et rend le corps solide et cohérent. Nous avons vu (cf chap. 6) que Perrault attribue à l'air subtil, supposé s'étendre beaucoup plus haut que l'air proprement dit, et être par ailleurs non élastique (ce qui lui permet de presser efficacement les corps, la pression exercée par l'air normal n'y suffisant pas), la cohésion ces corps solides. Quand l'air est si sec qu'il n'entre plus dans l'eau liquide, l'eau durcit et gèle, de la même façon que le fer trempé durcit. Mais l'eau, contrairement au fer, nous dit Perrault, n'augmente pas de volume, hypothèse que fait aussi à la même époque, nous l'avons vu, Mariotte, qui attribue aux bulles d'air qui se forment la rupture des parois des vases contenant de l'eau sous l'effet du gel. Perrault dit que plusieurs choses peuvent faire croire que le volume de l'eau augmente à la congélation : rupture des vases, bosses sur la surface de l'eau glacée, vides qui la font paraître spongieuse quand on la casse. Mais il trouve des contre-arguments. Ainsi, les vases peuvent éclater du fait qu'ils sont rétrécis par le froid, ce qui est parfaitement en ligne avec sa théorie. Quant aux bosses, elles peuvent être dues aussi au rétrécissement du vase qui comprime l'eau non encore gelée, et l'oblige à venir percer la couche de glace encore fine à la surface et l'épaissir. L'explication du caractère spongieux est peu claire, mais semble dire qu'il serait dû à l'absence des corpuscules communs, qui ne pénètrent plus dans le corps pour remplacer ceux qui s'échappent par évaporation, et laissent des interstices. Et, de fait, on peut comprendre que Perrault n'admette pas que l'eau augmente de volume en gelant, car cela ruinerait sa théorie, qui suppose un épuisement des corpuscules communs, et donc le rétrécissement du corps soumis à la pression de l'air subtil. La douleur qu'on ressent au gel ne vient pas, selon lui, du froid lui-même, mais de la constriction due à l'air subtil, à laquelle ne s'oppose plus la circulation des corpuscules communs, les artères étant resserrées et rétrécies.

Perrault remarque que tous les corps, à l'exception de l'eau qui est selon lui incompressible, rétrécissent au gel. À ce sujet, on en a fait « *plusieurs observations à l'Académie pendant le grand hiver de 1670. [...] on a trouvé que les corps les plus durs & les plus compacts, comme les métaux, le verre & les marbres se rétrécissent sensiblement par le froid, & qu'alors ils deviennent aigres & cassants, & qu'ils retournent à leur premier état dans le dégel* ». Et ce fait que l'eau n'augmente pas de volume résulte du fait que les parties propres de l'eau, de figure dodécaédrique [12 faces] ou icosaédrique [20 faces] sont « *fort mobiles quand elles sont mêlées aux corpuscules communs dont la plupart sont très ronds & très polis, [ce qui] les rend tout-à-fait incapables de mouvement lorsqu'elles sont destituées de ces corpuscules, à cause qu'elles ont des faces plates de tous les côtés qui s'appliquent les unes aux autres aussitôt que les corpuscules communs sont sortis* ». D'où l'explication de la rupture des vases : « *c'est donc par cette incompressibilité de l'eau, & par la compressibilité des autres corps que les vaisseaux remplis d'eau se rompent par la gelée* ».

3.5 L'atmosphère de matière éthérée électrique et magnétique de Béraud

Nous nous concentrons ici sur les travaux de Béraud (1848) portant sur les atmosphères magnétique et électrique, qui unifient au sein d'une même représentation les deux théories. Nous avons en effet déjà traité les atmosphères magnétique (cf chap. 4) et électrique (cf chap. 5), sans cependant exposer la théorie de Béraud, qui les réunit en une seule. Celui-ci commence par définir un critère lui permettant de comparer les matières subtiles, par nature inobservables, à savoir leur capacité à traverser les pores des corps. La matière éthérée, qui englobe l'ensemble des matières subtiles, est un fluide extrêmement élastique, constitué d'une infinité de petits tourbillons tournant sur eux-mêmes, dont chacun essaie de se dilater de par la force centrifuge. Les corps solides sont divisés en deux catégories : ceux qui contiennent moins de matière éthérée qu'un égal volume du fluide environnant, et ceux qui en contiennent plus. Pour faire cette supposition, Béraud se base sur les propriétés de la matière lumineuse :

Si un Corps solide peut contenir, à volume égal, plus de matière éthérée que n'en contient un autre solide spécifiquement plus léger, pourquoi un Corps solide & transparent n'en pourrait-il pas renfermer plus qu'il n'y en a dans un pareil volume d'air environnant. On sait que la réfraction de la lumière, en passant de l'air dans l'eau, & de l'eau dans le verre, se fait en l'approchant de la perpendiculaire, d'où on conjecture que la lumière a un mouvement plus libre dans un milieu plus

dense que dans un milieu moins dense. Il n'est donc pas hors de probabilité qu'il y ait plus de matière éthérée dans le verre que dans l'air, puisque dans celui-là elle trouve moins de résistance à son mouvement que dans celui-ci.

Les corps solides sont peuplés de deux types de pores, les grands qui laissent passer l'air et les vapeurs grossières, les petits qui ne laissent passer que la matière éthérée. Par la combinaison des grands et des petits pores, nous avons vu que l'on peut réconcilier, comme dans le cas de l'or, du fer et de l'aimant, les différences de densité entre les métaux et certaines de leurs propriétés. Béraud explique ensuite que, pour un corps qui contient moins de matière éthérée qu'un égal volume de l'air environnant, les tourbillons occupent au sein de ce corps un plus petit espace que dans leur état naturel, et l'élasticité de ces tourbillons, plus resserrés et tournant donc plus vite sur eux-mêmes, est plus grande que celle des tourbillons de l'air alentours. On peut comprendre ce surcroît d'élasticité comme étant dû au fait que la matière éthérée de l'intérieur doit s'opposer à la pression de la matière éthérée extérieure qui, plus abondante, cherche à entrer dans le corps.

De ce principe une fois établi de condensation, & conséquemment de pression dans la matière éthérée, causée par le Corps solide qui en contient moins qu'un égal volume d'air environnant, je tire deux conséquences : La première, que plus ce Corps solide occupera de volume, moins il donnera entrée à l'Éther, & plus aussi la matière éthérée qui l'environne, sera dense, plus la force de son ressort augmentera : La seconde, que la densité diminuant à proportion que les couches de l'Éther sont plus éloignées du Corps solide, son élasticité diminue aussi dans la même raison. Ainsi on doit considérer ce Corps solide comme environné d'une Atmosphère de matière éthérée, dont les couches en s'éloignant du Corps, vont toujours en diminuant de densité, & par conséquent de force élastique.

Et en effet, si le corps occupe plus de volume, il contient plus de petits tourbillons qui, s'opposant à la matière éthérée extérieure, lui font davantage barrage. L'atmosphère ainsi définie possède une densité qui décroît avec la distance au corps. De la même façon :

Si le Corps solide par la configuration & la multitude de ses petits pores, renferme plus de matière éthérée que l'air, à volume égal, on voit bien qu'il en doit résulter un effet tout contraire ; c'est-à-dire, que la matière éthérée, soit celle qui est renfermée dans ce Corps, soit celle qui l'entoure, occupant un plus grand espace que dans son être naturel, les petits tourbillons doivent s'étendre, le dilater & perdre conséquemment de leur force élastique : Ainsi je puis concevoir ce Corps solide comme environné d'une Atmosphère de matière éthérée, dont les couches en s'éloignant vont toujours en augmentant de densité, & par conséquent de force élastique.

La matière éthérée extérieure étant moins abondante, la pression s'exerce dans l'autre sens, et la densité croît avec la distance au corps. Ayant posé les bases de son système, voici comment Béraud définit l'aimant et le corps électrique :

L'Aimant est un Corps solide, qui par la rareté & la disposition de ses petits pores contient moins de matière éthérée qu'un pareil volume du fluide environnant. Le Corps électrique au contraire est un Corps solide, qui par la configuration de ses parties internes & la multitude de ses petits pores, renferme plus de matière éthérée qu'un pareil volume d'air. Tous deux font semblables, en ce qu'ils produisent leurs effets par le ressort de l'Éther; & ils sont différents en ce que l'Aimant est environné d'une Atmosphère de matière éthérée plus dense que dans son état naturel, & le Corps électrique est entouré d'une Atmosphère de la même matière, mais plus dilatée que dans son état naturel.

Concernant l'aimant, Béraud critique le système à double courant de Descartes, autant que celui à un seul courant de Dufay. Il expose les critiques faites par Lemonnier au principe même d'une circulation de la matière magnétique (cf chap. 4). Il cite les travaux de Molière, qui substitue « *une simple Atmosphère autour de l'Aimant à la place du Tourbillon de Descartes* », tout en regrettant que celui-ci « *qui connaissait si bien la nature de l'Éther, ne s'en soit pas servi pour composer son Atmosphère magnétique* », démarche que précisément Béraud expose dans son traité. Ayant remplacé le concept de tourbillon magnétique, par celui d'atmosphère magnétique, celle-ci s'affaiblissant avec la distance au corps magnétique, en accord avec le caractère spatialement limité de la sphère d'influence de l'aimant, il s'attache à retrouver l'ensemble des propriétés de l'aimant. Il montre que l'atmosphère d'un aimant, ou d'un morceau de fer aimanté, doit avoir, par symétrie, une figure ronde. Le corps magnétique, orientant naturellement ses pôles dans la direction sud-nord du fait de la circulation magnétique terrestre qui enfile ses canaux, conserve cette direction du fait que chaque petit tourbillon de son atmosphère s'oriente suivant la même direction, et la conserve ensuite par inertie. Ainsi, Béraud transforme le tourbillon cartésien macroscopique en petits tourbillons élémentaires de la matière magnétique, celle-ci n'étant plus animé d'un mouvement collectif de tourbillon. Il explique l'attraction entre deux aimants, comme Molière, par l'affinité entre leurs atmosphères magnétiques. Cette affinité tient au fait que, si l'on présente le pôle austral de l'un au pôle boréal de l'autre, les petits tourbillons composant les deux atmosphères tournent dans le même sens, et vont donc pouvoir se confondre. Dans le cas contraire, si le pôle boréal de l'un fait face au pôle boréal de l'autre, les tourbillons des deux atmosphères tournent dans des sens opposés, et refusent de se

mélanger, les deux atmosphères se comprimant mutuellement, sans pouvoir se pénétrer, et par conséquent se repoussant. Béraud analyse de la même façon les autres phénomènes de l'aimant, comme l'aimantation du fer, ou l'orientation de l'aiguille aimantée, parvenant à tous les expliquer naturellement à partir de son modèle de matière éthérée.

Béraud passe ensuite à la matière électrique en traitant le cas des corps dont l'atmosphère de matière éthérée se densifie avec la distance au corps :

L'ETHER est le principe du Magnétisme & de l'Électricité, & comme il s'étend partout, aussi tous les corps sont pleins du fluide magnétique & électrique. Ce ne sont que les différentes modifications de cette même matière, qui donnent occasion à ses différents effets ; se trouve-t-elle condensée autour d'un corps solide, tel que l'Aimant, elle produit comme nous l'avons vu, les effets magnétiques. Se trouve-t-elle au contraire dilatée autour de certains autres corps, elle fait briller les Phénomènes électriques, avec cette différence cependant que pour les effets magnétiques sa seule condensation suffit avec la disposition interne des parties de l'Aimant, & pour les Phénomènes électriques sa condensation seule avec la structure des molécules du corps électrique ne suffisent pas, il faut encore une raison, un Frottement sur ce corps. Pour traiter avec ordre une matière si embarrassée, définissons chaque chose & n'admettons aucun terme dont nous n'ayons une idée claire.

Il distingue deux sortes de corps électriques, « ceux qui le sont par eux-mêmes & ceux qui le sont par communication ». (cf chap. 5). Il tente de définir ce qu'est un corps électrique « par lui-même ». C'est un corps qu'il faut, pour l'électriser, « échauffer par le frottement & [...] en conséquence de ce frottement on ressent autour de ce corps une matière très subtile & extrêmement agitée, qui par son agitation produit les Phénomènes dont nous cherchons la cause », à savoir les sensations qu'on ressent au voisinage du corps, et les phénomènes d'attraction et de répulsion vis-à-vis des corps légers qui se trouvent au voisinage : « il faut donc que le corps électrique, premièrement, contienne beaucoup de cette matière subtile qui est la matière éthérée ; secondement, que ses parties soient telles qu'elles puissent être aisément agitées par le frottement, & qu'elles puissent ensuite communiquer leur agitation à la matière éthérée qu'elles renferment ». Et Béraud de conclure :

1°. Qu'un corps électrique par lui-même, est celui qui par la multitude de ses petits pores propres à donner passage à la matière éthérée en contient beaucoup plus qu'un pareil volume d'air, où ce qui est le même, qui à volume égal offre à cette matière un plus grand espace que l'air, & dont les parties insensibles sont assez raides pour l'ébranler, s'agiter à l'occasion du frottement & recevoir comme un mouvement de vibration. 2°. Que la vertu électrique n'est autre chose qu'une matière éthérée mise en

mouvement par les secousses, le trémoussement des petites parties du corps électrique. 3°. Qu'électriser un corps, c'est par le frottement ébranler ses parties insensibles qui communiquent leur mouvement à la matière éthérée qu'elle renferment.

Il explique que son idée est fondée sur l'expérience, en cela que c'est dans le verre et les autres corps transparents que l'électricité se manifeste avec le plus de force, ces corps contenant justement « *dans leurs petits pores beaucoup de matière éthérée puisque vraisemblablement, leur transparence ne vient que de la multitude des passages libres qu'ils présentent à la matière céleste le véhicule de la lumière* ». Par ailleurs, « *leurs parties n'ont-elles pas la raideur que nous avons exigé, puisque ces corps sont cassants, friables & capables d'être réduits en poussières?* ». Il mentionne des substances, comme le soufre et la cire, qui « *sont moins électriques que le verre, parce que leurs molécules sont moins raides & plus liées ensemble* ». Par comparaison à la matière lumineuse, Béraud écrit :

On a dit que tous les corps étaient des éponges de lumière, parce qu'ils étaient tous pénétrés de la matière qui fait la lumière ; par la même raison on peut dire qu'ils sont tous des éponges de matière électrique, & c'est pour cela qu'ils sont tous électriques par communication. Il y en a qui ne le sont que par cette voie, tels sont ceux qui à raison de leur fluidité ou de leur facilité à s'amollir ne sont pas susceptibles de frottement : d'autres quoique frottés & échauffés comme les corps vivants & les métaux n'ont encore donné aucun signe de l'électricité ; ces corps, il est vrai, contiennent beaucoup de matière éthérée ; mais il leur manque la seconde qualité nécessaire au corps électrique ; leurs parties intégrantes n'ont pas la raideur qu'il faut pour produire les effets électriques.

Ainsi, la mise en mouvement de la matière éthérée par frottement, qui exige une raideur des pores, de façon à ce que le mouvement de frottement se communique à la matière contenue dans les pores, est un déterminant essentiel du problème. Béraud mentionne les molécules qui forment la chair des corps vivants, dont la mollesse ne permet pas la transmission de l'excitation de vibration à la matière éthérée, ainsi que les métaux, dont la ductilité, pareillement, ne les prête pas à s'électriser par frottement. Les corps qui ne sont pas électriques par eux-mêmes peuvent néanmoins s'électriser par communication, acquérant « *par communication ce même mouvement de la matière homogène qui se trouve dans le globe de verre, & autour de ce globe quand on l'a électrisé* ». Béraud s'emploie ensuite à déduire de son système l'explication des quatre principaux phénomènes de l'électricité selon lui : l'attraction et la répulsion, sa communication et sa propagation, les pétilllements sonores et les commotions physiques qui l'accompagnent, la lumière qu'elle produit. Il prend le cas d'un globe de verre tournant qu'on

frotte, avec la main ou une étoffe. L'ébranlement qui en résulte augmente le degré de vitesse des tourbillons intérieurs au globe, qui donc s'agrandissent de par la force centrifuge, et, se dilatant, pressent sur l'éther environnant, occasionnant des filets électriques qui se lancent vers l'extérieur.

Cette expansion des filets électriques ne peut pas le faire sans qu'il y ait un choc contre l'Éther environnant, qui étant plus dense & ayant par-là plus de Force de ressort doit réagir sur ces filets, & les repousser vers le globe. Voilà donc deux forces opposées, l'une qui pousse les tourbillons du globe à la circonférence de l'Atmosphère, l'autre qui les repousse de la circonférence au globe ; c'est un flux & un reflux d'une matière homogène : un flux causé par la dilatation des tourbillons intérieurs, un reflux produit par la dualité de l'Éther environnant : & voilà la cause de cette impression subite que l'on ressent sur la main, sur le visage quand on les approche d'un Tube de verre ou d'un globe électrisé.

Il remarque que son hypothèse se rapproche du système de Nollet de la matière effluente et affluente. L'explication des effets d'attraction et de répulsion nécessite un raisonnement assez complexe. Il faut faire l'hypothèse que les corps électriques par eux-mêmes (comme le verre), qui contiennent plus de matière éthérée que les corps électrisables par communication (comme les métaux), ont néanmoins des canaux plus étroits que ceux-ci. Ainsi, les filets qui s'élancent du globe de verre pénètrent plus aisément dans les pores des métaux que dans ceux du verre, ceux-là étant plus larges que ceux-ci, ce qui explique que les métaux, non-électriques (du fait de la ductilité de leur matière), s'électrisent bien, tandis que le verre ne s'électrise pas par communication (du fait de l'étroitesse de ses pores). Le phénomène d'attraction s'explique par l'affaiblissement des filets électriques (par exemple émis par le globe de verre) provoqué par les corps qu'ils rencontrent sur leur passage (par exemple de petits morceaux de métal), les tourbillons des atmosphères de ces corps absorbant une partie du mouvement des filets, ce qui les fait refluer vers le corps qui les a émis sous la pression de l'éther extérieur, résultant dans un effet d'attraction. Mais lorsque les corps attirés parviennent au voisinage du corps émettant les filets électriques, de nouveaux filets, s'opposant à leur mouvement, les repoussent, d'où la répulsion qui suit l'attraction des corps du voisinage, lorsque ceux-ci viennent au contact du corps électrisé par frottement qui les a dans un premier temps attirés. Béraud développe ainsi tout un système d'action-réaction entre les filets magnétiques, pressant vers l'extérieur, et l'éther environnant, pressant vers l'intérieur, pour expliquer les différentes propriétés de l'électricité.

Ce système ingénieux, d'inspiration cartésienne, constitue une tentative intéressante d'unification des matières électriques et magnétique au sein d'un même cadre conceptuel vers le milieu du XVIII^{ème} siècle, avant l'invention de l'électromagnétisme. Il est basé sur l'idée d'une atmosphère de matière éthérée (électrique et magnétique) entourant les corps, les propriétés électriques et magnétiques des corps étant réglées par les interactions entre leurs atmosphères. Ce modèle est clairement déduit de considérations sur la lumière, et sur la chaleur, qui servent à Bérault de guide pour définir les propriétés des corps vis-à-vis de la matière éthérée, propriétés essentielles puisqu'en l'absence d'observations de la matière éthérée, on ne peut la caractériser qu'à partir de son interaction supposée avec la matière poreuse.

3.6 Les atmosphères ignées et lumineuses de Marat

3.6.1 Position de Marat sur le Phlogistique

Jean-Paul Marat mène dans les années 1770 des expériences sur la matière ignée et les atmosphères de feu. Il utilise à cette fin un microscope solaire de projection, instrument optique utilisant le soleil comme source lumineuse, conçu et réalisé trente ans auparavant par Johann Nathanael Lieberkühn, savant membre de l'Académie Royale de Berlin. L'instrument est ensuite repris et perfectionné par l'abbé Nollet. Il nécessite une source de lumière intense, car son objectif possède une faible ouverture (4 cm) et un court foyer (18 cm). L'image du soleil est projetée sur un carton d'environ 1,50 mètre de côté dans une salle obscure, la lumière n'y entrant que par le canon du microscope, et il est ainsi possible, en interposant l'objet ou le milieu à étudier, qui doivent être au moins partiellement transparents, de visualiser avec une bonne résolution leur structure interne et ses variations. Marat, dans le chapitre terminal de ses *Recherches physiques sur le feu* (1780), nous dit que « *comme les rayons de lumière se replient constamment à la circonférence de tout corps dont ils traversent la sphère d'attraction, on ne doit point se flatter d'apercevoir à l'aide de cette méthode, des corpuscules isolés ; & quoi qu'elle serve à rendre visible l'air même, les particules du fluide le moins subtil ne peuvent néanmoins s'apercevoir qu'en masse* ». Il fait sans doute ici référence à la diffraction de la lumière. Il ajoute une précision importante, à savoir que les émanations ignées d'un corps chaud ne peuvent être vues si elles évoluent au sein d'un milieu identique ayant même densité. Le terme « identique » est surprenant, dans la mesure où Marat suppose le fluide igné distinct en nature de l'air. « *Il suit de là qu'on ne saurait voir les émanations ignées d'un corps chaud, si l'air ambiant est à la même température : aussi les expériences délicates réussissent-elles*

incomparablement mieux par un temps froid que par un temps chaud ». Les objets à observer sont placés sur une petite table que l'on peut déplacer horizontalement à l'aide d'une crémaillère à large denture, de manière à rechercher le point précis auquel l'ombre projetée sur l'écran du corps est nette.

L'objectif du traité de Marat, dont un précis est publié sous la forme d'un article intitulé *Mémoire sur la combustion en général* en 1779, sous le sceau de quatre académiciens en garantissant la valeur et l'intérêt, est d'établir l'existence du fluide igné et de le caractériser. Ces académiciens, dans leur rapport, nous disent de ce mémoire qu'il « *renferme plus de cent vingt Expériences, qui toutes, ou au moins la plus grande partie, ont été faites par un moyen nouveau, ingénieux, & qui ouvre un grand champ à de nouvelles recherches dans la Physique ; ce moyen, c'est le Microscope solaire* ». Ils mentionnent que Franklin a assisté aux expériences, et que présentant sa tête et ses mains, « *on vit s'élever sur la toile des émanations* ». Ils concluent leur rapport en ces termes :

Nous nous contenterons ainsi d'observer qu'il paraît constant par toutes les Expériences que nous avons vues, qu'il sort & émane des corps échauffés, rouges, incandescents, un fluide, que ce fluide forme autour de ces corps une atmosphère d'une figure pyramidale ou sphéroïdo-conique, ayant le sommet tourné en haut ; que ce fluide porte la chaleur avec lui à une distance beaucoup plus grande au-dessus de ces corps, que de tous les autres côtés, comme on le prouve sensiblement, en réunissant ce fluide au moyen d'un entonnoir, placé au-dessus des émanations ; car alors il enflamme les corps combustibles qu'on lui présente. Enfin, que ce fluide est expansif & qu'on peut l'attirer, l'agiter comme l'air, &c. Nous ajouterons d'ailleurs que les Expériences sur lesquelles l'Auteur appuie sa Théorie, & dont plusieurs ont été répétées devant nous nombre de fois, nous ont paru très exactes, & que nous les avons toutes vérifiées, autant qu'il est possible de le faire dans un examen de cette nature.

Dans l'introduction du traité de 1780, Marat critique l'opinion selon laquelle « *le feu est un être élémentaire, dont la matière éparsée dans tous les corps, reste cachée tant qu'elle n'est pas rassemblée par le mouvement [...], [qui] doit être rangée parmi beaucoup d'autres fort mal fondées, quoique fort spécieuse* ». Si « *le feu est une matière destinée à produire, par sa simple présence, lumière & chaleur* », et qu'il est renfermé dans les corps, « *pourquoi donc chaque corps n'est-il pas chaud et lumineux ?* ».

Comment se peut-il que le feu, épars dans les mixtes, s'y entretienne sans les consumer ? Comme se peut-il qu'il s'y entretienne lui-même ? Quoi! de petites étincelles se conserveraient des années

entières dans le marbre, tandis qu'un brasier ne peut se conserver quelques jours sous la cendre ? Que dis-je ! tandis qu'à peine un charbon ardent pourrait s'entretenir une seconde dans l'esprit-de-vin ; d'imperceptibles atomes de feu s'entretiendraient des milliers de siècles dans le sein des matières les moins combustibles, dans le sein même de celles qui le détruisent ? Si ce ne sont pas là des absurdités, je ne sais ce qu'on appelle de ce nom.

Marat donne des exemples de feu allumé par frottement, et conclut que si les corps renfermaient autant de feu, « *il les consumerait sans cesse, & réduirait bientôt l'univers en cendre* ». D'autre part, comment des substances incombustibles comme l'or, les pierres, le verre, peuvent-elles briller quand on les soumet à l'action du feu ? « *Comment quelques corpuscules réunis embraseraient-ils un corps entier, vue l'inconvertibilité des éléments ?* ». Il argumente ensuite contre la doctrine de la convertibilité des éléments sur des exemples précis. Il cite Boerhaave, qui prétend que le feu peut se dégager des substances qui se congèlent, et s'élève contre la théorie du phlogistique en tant que principe du feu préexistant dans les corps. « *Si le phlogistique est la pure matière du feu, pourquoi n'est-il pas lumineux et brûlant ?* ». Pour Marat, la substance commune à toutes les matières inflammables, bitumineuses, résineuses, graisseuses, butireuses ou huileuses, est l'huile.

C'est ce principe huileux rectifié au dernier point qui, sous la forme d'esprit ardent & le nom de phlogistique, fait le vrai principe inflammable des corps. Toujours identique de quelque substance qu'on le tire, il ne diffère que par les matières hétérogènes qui lui sont alliées : mais quelque pur qu'il soit, il n'est jamais lumineux, toujours il se met à la température du milieu ambiant ; quelquefois même il est fort au-dessous du terme glace. Dans leur système, voilà donc du feu obscur & froid, ce qui implique contradiction.

Le phlogistique est donc pour Marat le principe huileux, pas la matière du feu en elle-même. Et Marat de conclure son introduction :

De tant d'autres preuves à l'appui de celles que nous avons données, bornons-nous à la plus concluante de toutes. La voici : le phlogistique est la seule matière inflammable connue ; mais dans les corps, nul principe soumis à l'action du feu, qui ne paraisse converti en ce prétendu élément. Dans une fournaise, la terre la plus pure devient incandescente ; & dans un vase bien épais, l'eau même rougit à blanc : le feu qui les pénètre est donc distinct du phlogistique.

De tout ce qui précède, il suit que le feu n'est pas matière. Qu'est-il donc ? Il est possible de répondre à cette question d'une manière satisfaisante. Ainsi ne nous contentons pas d'avoir renversé un système reçu ; mettons quelque chose à la place.

On ne peut, avant de détailler les résultats de Marat, faire l'économie d'un examen du contexte, ce qui nécessite de s'intéresser à la théorie de la combustion de Lavoisier, dont les bases ont été publiées dans les MARS de 1777, deux ans avant la première publication des résultats des travaux de Marat, et de Hooke, dont les travaux précurseurs sur la combustion et la nature de l'air un siècle auparavant, ont influencé Lavoisier.

3.6.2 Les précurseurs : Hooke, puis Lavoisier

Hooke, dans son Observation VI des *Micrographia* (1667), explique ainsi la cause de l'élasticité de l'air, considéré par lui comme une solution dans l'éther de particules terrestres et aqueuses :

Et nous savons qu'un degré suffisant de chaleur cause la fluidité, dans certains corps plus tôt, dans d'autres plus tard ; c'est-à-dire que les parties de certains corps sont si écartées les unes des autres, et si impropres à montrer de la cohérence, et si infimes et peu nombreuses, qu'un très petit degré d'agitation suffit à les garder toujours dans l'état de fluidité. De cette sorte est, je suppose, l'Æther, c'est-à-dire le milieu ou le corps fluide, dans lequel tous les autres corps paraissent nager et se mouvoir ; et particulièrement l'Air, qui semble n'être rien d'autre qu'un genre de teinture ou de solution des particules terrestres et aqueuses dissoutes en lui [l'éther], et agitées par lui, juste comme une teinture de Cochenille n'est rien d'autre que les parties solubles plus fines de ce Concret humecté ou dissout par l'eau fluide. Et à partir de cette notion, nous pouvons aisément donner une raison plus intelligible pour laquelle l'air devient capable de Raréfaction et de Condensation.

Cette définition de l'air par Hooke est à l'époque citée dans l'article AIR du *Lexicon Technicum* (1704). Nous verrons qu'elle a une grande influence sur la conception de Lavoisier un siècle plus tard. Mais nous devons tout d'abord examiner la conception que se fait Hooke de la combustion, qu'il développe dans son Observation XVI des *Micrographia*. Celui-ci commence par y traiter la question de la porosité, dont la structure nous est dévoilée par le microscope. Un morceau de charbon de bois observé au microscope montre un grand nombre de pores rangés à sa surface en structures circulaires et radiantes. Ces pores occupent toute sa masse, de sorte que l'air qu'on souffle le traverse de part en part. Lorsqu'on utilise un microscope plus puissant, on peut voir d'innombrables pores plus fins régulièrement disposés, si proches les uns des autres, qu'ils laissent très peu d'espace entre eux pour la matière, les cloisons séparant les pores étant à certains endroits si fines, qu'une structure en nid d'abeille ne pourrait être plus poreuse. Une fine tranche de charbon, placée sous le microscope, apparaît transparente à la lumière. Hooke

estime à 5 millions le nombre de pores occupant une surface circulaire de 1 pouce de diamètre. Cette observation lui permet d'expliquer plusieurs propriétés du charbon. Tout d'abord sa couleur noire, par le fait que la lumière qui pénètre dans les pores ne peut en ressortir, car absorbée après réflexion par les parois des pores. Secondement, la qualité de luminosité du charbon s'explique par la terminaison régulière des interstices solides, les nombreuses réflexions de la lumière à leur surface se fondant en une seule, qui rendent la surface uniformément brillante. Troisièmement, sa dureté et sa friabilité, les substances liquides d'abord contenues les pores, et qui ont été évaporées, laissant derrière elles un corps de nature pierreuse, qui ne peut être plié sans rupture de continuité. Si l'on place le corps à carboniser dans un creuset, et qu'on recouvre ce corps de sable pour éviter tout contact avec l'air, puis qu'on place le creuset sur un feu et l'y laisse un certain temps avec le sable chauffé au rouge, on fabrique du charbon. Mais, si l'on ne prend pas soin de laisser refroidir le sable avant de mettre le corps à l'air, celui-ci s'enflamme et continue à brûler. On obtient le même résultat avec un vaisseau de verre, dans lequel les substances fluides émises par le corps durant la combustion sont recueillies dans un récipient, à savoir que la carbonisation s'obtient par l'application d'une forte chaleur à un corps, que l'on doit préserver de l'accès libre à l'air. L'analyse des substances recueillies montre qu'elles ne sont pas combustibles, et que la matière abandonnée par ces matières l'est, ce qui montre que « *les interstices solides du bois sont la matière combustible* ». La raison pour laquelle le bois non carbonisé brûle avec une plus grande flamme que le charbon est que les parties volatiles du bois enflammé font éclater et ouvrent le corps, permettant au feu d'entrer, ces vapeurs par ailleurs soufflant et agitant la partie enflammée, ce qui se traduit par une dissolution plus violente et rapide de sa matière. Hooke tire plusieurs enseignements de ces constatations. Tout d'abord, l'air qui nous entoure est un solvant qui dissout les matières inflammables. Ensuite, cette action nécessite que le corps atteigne un certain degré de chaleur, ce qui est le cas de nombreux autres corps dans leur dissolution par les solvants. De plus, « *cette action de dissolution produit ou génère une très grande chaleur, que nous désignons sous le nom de feu, ce qui est commun aussi à de nombreuses dissolutions d'autres corps* ». Par ailleurs, cette action, de par sa grande violence, produit dans le milieu diaphane de l'air des flashes lumineux. Un point essentiel du processus est que « *la dissolution des corps inflammables est opérée par une substance inhérente, et mélangée à l'air, qui ressemble, si elle n'est semblable, à celle qui est fixée dans le salpêtre* ». Lors de cette dissolution des corps par l'air, une fraction de la part soluble du corps retourne à l'air, et le suit dans son mouvement. Il existe également une part non soluble qui coagule en se séparant de l'air, mais qui est suffisamment légère pour être transportée par lui, et condenser

ailleurs, en formant certains sels que l'on peut extraire de la suie. Par ailleurs, de nombreuses substances terrestres solubles et non solubles, autres que les sels précédemment mentionnés, sont soulevées et emportées par l'air ambiant. Il existe également dans le corps enflammé des substances non solubles dans le solvant de l'air, et qui du fait de leur poids ne peuvent être soulevées, et c'est elles qui forment la cendre qui reste après le feu. Enfin, les parties de l'air impliquées dans la dissolution sont peu nombreuses, tout comme celles des solvants salins, et la dissolution atteint vite la saturation, à moins que des parties fraîches du solvant ne soient appliquées au corps à dissoudre, sans quoi le corps cesse de se dissoudre et de briller. On observe donc que l'application d'air neuf, par exemple par l'utilisation d'un soufflet, sur un corps brûlant, en accélère aussitôt la dissolution, aussi violemment que le ferait un solvant de nitre fondu. Il semble donc raisonnable de penser que l'Élément du Feu, supposé par certains préexister au sein des corps, n'existe pas, mais au contraire :

[...] que ce corps passager lumineux, que nous appelons flamme, n'est rien d'autre qu'un mélange d'air et de parties sulfureuses volatiles des corps dissolubles et combustibles, agissant les uns sur les autres tandis qu'ils s'élèvent. Autrement dit, la flamme semble être un mélange d'air et de parties combustibles et volatiles de tout corps dont l'air environnant dissout et travaille les parties, laquelle action, comme elle accroît la chaleur des parties aériennes du solvant, raréfie encore davantage ces parties agissantes, ou celles qui sont proches, à cause qu'elles deviennent plus légères que les parties plus éloignées, et les faisant saillir, les élève ; et on peut facilement l'observer aussi dans les dissolutions opérées par les autres solvants, en particulier ceux qui créent, soit de la chaleur, soit des bulles. Cette action du solvant, ou de l'air, sur les parties non solubles, est faite avec la même violence, ou imprime à la partie diaphane de l'air le même mouvement, ou la même impulsion, que j'ai montrés ailleurs comme étant nécessaires pour produire de la lumière.

Lavoisier, dans son article de 1777, commence par définir les quatre phénomènes constants dans la combustion des corps :

Premier Phénomène. *Dans toute combustion, il y a dégagement de matière du feu ou de la lumière.*

Second Phénomène. *Les corps ne peuvent brûler que dans un très petit nombre d'espèces d'airs, ou plutôt même, il ne peut y avoir de combustion que dans une seule espèce d'air, dans celle que M. Priestley a nommé air déphlogistiqué, & que je nommerai ici air pur. [...]*

Troisième Phénomène. *Dans toute combustion, il y a destruction ou décomposition de l'air pur, dans lequel se fait la combustion, & le corps brûlé augmente de poids exactement dans la proportion de la quantité d'air détruit ou décomposé.*

Quatrième Phénomène. *Dans toute combustion, le corps brûlé se change en un acide, par l'addition de la substance qui a augmenté son poids ainsi, par exemple, si on brûle du soufre sous une cloche, le produit de la combustion est de l'acide vitriolique [...] si on brûle une substance charbonneuse, le produit de la combustion est de l'air fixe autrement dit, de l'acide crayeux &c.*

Les principes sont les mêmes pour la calcination des métaux, sauf qu'il y a dans ce cas formation de chaux métallique, au lieu d'un acide. Il critique ensuite, comme le fait Marat, la théorie du phlogistique, dont il remarque qu'elle conduit à un cercle vicieux : les corps contiennent de la matière du feu parce qu'ils brûlent, et ils brûlent parce qu'ils contiennent de la matière du feu. Lavoisier définit ainsi la matière du feu : « *la matière du feu ou de la lumière, est un fluide très subtil, très rare, très élastique, qui environne de toutes parts la Planète que nous habitons, qui pénètre avec plus ou moins de facilité les corps qui la composent, & qui tend, lorsqu'il est libre, à se mettre en équilibre dans tous* », et dit ceci à son propos :

J'ajouterai, en empruntant le langage chimique, que ce fluide est le dissolvant d'un grand nombre de corps ; qu'il se combine avec eux de la même manière que l'eau se combine avec ses sels ; que les acides se combinent avec les métaux ; & que les corps ainsi combinés & dissous par le fluide igné, perdent en partie les propriétés qu'ils avoient avant la combinaison, & en acquièrent de nouvelles qui les rapprochent de celles de la matière du feu.

Ainsi, si nous substituons à l'éther de Hooke la matière du feu, nous retrouvons précisément la définition que donne Hooke de l'atmosphère, à savoir une solution de corps terrestres dissouts dans l'éther. Et Lavoisier de poursuivre, toujours fidèle à l'esprit de Hooke, cette fois concernant l'élasticité de l'air : « *tout fluide aériforme, toute espèce d'air, est un résultat de la combinaison d'un corps quelconque solide ou fluide, avec la matière du feu ou de la lumière ; & c'est à cette combinaison que les fluides aériformes doivent leur élasticité, leur légèreté spécifique, leur rareté, toutes les autres propriétés qui les rapprochent du fluide igné* ». Puis Lavoisier livre sa théorie de la combustion, précisant la conception de Hooke :

L'air pur [...] est une combinaison ignée dans laquelle la matière du feu ou de sa lumière entre comme dissolvant, & dans laquelle une autre substance entre comme base ; or si dans une dissolution quelconque, on présente à la base une substance avec laquelle elle ait plus d'affinité, elle s'y unit à l'instant, & le dissolvant qu'elle a quitté devient libre.

La même chose arrive à l'air pendant la combustion ; le corps qui brûle lui ravit sa base ; dès lors la matière du feu qui lui servait de dissolvant, devient libre ; elle reprend tous ses droits, & s'échappe avec les caractères qu'on lui connaît, c'est-à-dire avec flamme, chaleur & lumière.

[...] ainsi pour résumer, l'air est composé, suivant moi, de la matière du feu comme dissolvant, combinée avec une substance qui lui sert de base & en quelque façon qui la neutralise ; toutes les fois qu'on présente à cette base une substance avec laquelle elle a plus d'affinité, elle quitte son dissolvant ; dès lors la matière du feu reprend ses droits, ses propriétés, & reparait à nos yeux avec chaleur, flamme & lumière.

Ainsi, « on voit qu'il n'est plus besoin pour expliquer les phénomènes de la combustion, de supposer qu'il existe une quantité immense de feu fixée dans tous les corps que nous nommons combustibles [...] & peut-être même, qu'il n'existe dans ces substances que de la matière de feu libre, en vertu de la propriété qu'a cette matière de se mettre en équilibre avec tous les corps environnants ». Puis Lavoisier parle des trois états de la matière : solide, liquide, air (ou vapeur), en jugeant que ces « trois états ne dépendent que de la quantité plus ou moins grande de matière du feu dont ces corps sont pénétrés & avec laquelle ils sont combinés ». La fluidité, la vaporisation, l'élasticité sont caractéristiques de la présence du feu en grande quantité, la solidité et la compacité étant en revanche les preuves de son absence : « autant donc il est prouvé que les substance aériformes & l'air lui-même, contiennent une grande quantité de feu combiné, autant il est probable que les corps solides en contiennent peu ». En effet, pour Lavoisier, tout l'air qui nous environne est le résultat de la combustion des corps, au cours de laquelle la « base » se dissout dans la matière du feu. On a vu qu'il associe étroitement « chaleur, flamme & lumière » comme propriétés de la matière du feu, et son explication des trois états de la matière par la présence ou l'absence du feu, c'est-à-dire aussi de la chaleur, est cohérente. Il écrit, à propos de l'élasticité de l'air :

[...] je ne puis cependant me dispenser de faire encore remarquer avec quelle facilité elle explique pourquoi l'air est un fluide élastique & rare : en effet le feu étant le plus subtil, le plus élastique & le plus rare de tous les fluides, il doit communiquer une partie de ses propriétés aux substances auxquelles il s'unit, & de même que les dissolutions des sels par l'eau conservent toujours une partie des propriétés aqueuses, de même aussi les dissolutions par le feu doivent conserver une partie des propriétés ignées.

On conçoit encore pourquoi il ne peut y avoir de combustion ni dans le vide, ni même dans aucune combinaison aériforme, où la matière du feu a une très grande affinité avec la base avec laquelle elle est combinée.

La dernière partie de son article est consacrée à la respiration ces animaux, qu'il assimile à un mécanisme de combustion fournissant de la chaleur au corps et le maintenant à une température constante.

3.6.3 Résultats obtenus par Marat

Dans ses *Découvertes sur le feu, l'électricité et la lumière* (1779), Marat commence par énoncer que le principe de la chaleur est présent dans tous les corps. Mais quels sont ses effets ? Le feu paraît n'agir qu'à la surface des combustibles, mais leur intérieur est chaud, ce qui suppose l'action d'un fluide qui pénètre leurs tissus. Marat, tout au long de son article, identifie matière du feu et matière de la chaleur au sein d'un fluide igné environnant toute chose. L'inflammation peut se communiquer sans contact par la chaleur :

Si vous présentez à une bougie allumée une bougie qu'on vient d'éteindre, vous la verrez se rallumer avant d'avoir touché à la flamme. A l'approche d'un fer rouge, une bandelette de papier trempé dans une dissolution de cuivre par l'acide nitreux s'enflamme à travers les parois d'un bocal. La cire fond à dix pas d'une fournaise. Or ces effets ne peuvent avoir lieu qu'à l'aide d'un fluide qui étend au loin sa sphère d'activité.

Un corps froid appliqué sur un corps chaud le prive peu à peu de chaleur, jusqu'à ce qu'il en ait acquis un égal degré : ce qui suppose un fluide passant de l'un à l'autre.

Le refroidissement des corps par contact est mesurable : on apprécie le point de chaleur que doivent contracter par leur mélange les liquides homogènes échauffés à différents degrés ; & ce point correspond toujours au rapport qu'on observe dans les mobiles qui se choquent entre la masse & la vitesse : le refroidissement est donc produit par la diminution du mouvement d'un fluide.

Enfin le camphre, le naphte, les huiles essentielles, l'esprit de vin, le phosphore, &c. quoique très imprégnés de fluide igné, sont toujours à la température du milieu qui les environne : c'est donc le mouvement de ce fluide, non sa présence, qui produit la chaleur & le feu.

Projetant grâce au microscope solaire la flamme d'une bougie sur un écran dans la chambre obscure, « on voit sur la toile s'élever autour de la mèche un cylindre allongé, diaphane, ondoyant. Dans ce cylindre, on distingue l'image de la flamme : elle paraît sous la forme d'une navette rousse, qui en circonscrit une autre moins colorée, au centre de laquelle brille un petit jet blanc : ce cylindre est bordé d'une raie brillante, à l'exception du sommet qui se divise en plusieurs jets tourbillonnants, bordés chacun d'une raie brillante plus petite ». L'ombre projetée d'un charbon embrasé est pareillement « environnée d'une raie brillante, & surmontée d'une touffe de jets moins brillants, mais formant de même mille virevoltes ». Des morceaux

incandescents d'or ou d'argent, ou de porcelaine, corps inaltérables au feu, chauffés sans aucun contact avec les effluves du charbon (dans un fourneau de coupelle), génèrent des figures similaires. Les effluves s'échappant de ces corps, inaltérables au feu et donc sans émanations volatiles, « *ne peuvent être que des flots du fluide igné* ». Ces émanations ne peuvent-elles tenir au milieu ambiant altéré par le feu ? La réponse est non, car on constate qu'on ne parvient pas à les détacher de la superficie du corps incandescent en soufflant de l'air sur ce corps, ou encore qu'elles ne sont pas moins considérables quand on diminue la pression de l'air. Des combustibles présentés à ces émanations s'enflamment, effets que ces émanations ne pourrait produire si elle n'étaient pas le véritable principe du feu.

Marat caractérise ainsi le fluide igné : « *Ce fluide est transparent, & sa transparence est telle que les vapeurs les plus légères l'altèrent toujours. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer dans la chambre obscure l'ombre des exhalaisons de l'eau bouillante à celles des émanations d'un corps incandescent inaltérable au feu* ». Puis il parle de la luminosité du fluide igné, dont la lueur sur la toile est plus vive que les émanations d'un corps chaud, luminosité qu'il attribue au fait que le fluide igné serait plus dense que l'air (ce qui semble contredire le fait qu'il s'élève dans l'air ambiant), plus propre à rassembler les rayons solaires. Ainsi, lorsqu'on pousse du bout d'un poinçon un corps chaud suspendu dans le flot de fluide igné, celui-ci acquiert plus d'éclat du côté où le corps est poussé, c'est-à-dire là où le fluide igné est comprimé par le mouvement du corps, du fait de la pression de l'air. Le fluide igné est pesant, puisque les métaux rougis perdent de leur poids en refroidissant. Il est doué d'une grande force expansive, comme le prouve la raréfaction de l'air chaud. Il est compressible, car suspendant un petit boulet porté au rouge dans une cavité de verre reliée à une machine pneumatique, on voit « *dans la chambre obscure l'atmosphère ignée s'étendre à mesure qu'on fait le vide, & revenir à ses dimensions primitives à mesure qu'on fait rentrer l'air* ». Mais, nous dit Marat, il n'est pas élastique, car plaçant un boule creuse percée d'un trou, et portée au rouge, dans la cavité, on ne voit pas le fluide igné dont elle est remplie « *s'échapper en plus grande quantité, par cette ouverture, que par tout autre point de sa superficie ; mais lorsqu'on introduit un peu d'air dans la cavité, violemment dilaté par la chaleur, il entraîne notre fluide au dehors : aussi l'en voit-on jaillir à grands jets* ». « *Puisque le fluide igné pénètre tous les corps [...] quelle que soit la coupe de leurs pores* », nous dit Marat, « *ses corpuscules doivent être d'une étonnante petitesse, & d'une figure globuleuse* ». Marat ne note pas que, dans l'expérience précédente, si le fluide igné traverse avec autant de facilité la paroi de la boule que l'ouverture qui y est pratiqué, il n'est pas nécessaire pour expliquer l'observation de le supposer non élastique (ce qui semble

d'ailleurs contredire le fait qu'il est trouvé compressible - et dilatable -). La dureté des globules du fluide igné est extrême, puisqu'il consume le diamant.

Marat se demande ensuite si, lumière et chaleur étant toujours réunies dans le feu, le fluide lumineux est identique au fluide igné. Si c'était le cas, une concentration de lumière devrait être accompagnée d'une atmosphère ignée, que l'on verrait grâce au microscope solaire. Faisant se croiser les rayons transmis par deux microscopes solaires distants l'un de l'autre, de sorte que « *le foyer d'un des faisceaux se perde dans le cône que forme l'autre, lorsque ses rayons sont devenus divergents ; on ne voit point sur la toile, où porte la base de ce cône, l'image de ce foyer* ». Le fluide igné est ainsi absent du foyer où les rayons solaires convergent, mais que l'on expose à ce foyer différents combustibles, « *on voit le fluide igné s'échapper de ces corps, en quantité proportionnelle au temps où ils y sont exposés, & au degré de chaleur dont ils sont susceptibles* ». « *Concluons* », nous dit Marat, « *que les rayons solaires ne sont autre chose que la matière de la lumière même, poussée en droite ligne par l'action du soleil ; & que s'ils produisent de la chaleur, ce n'est qu'autant qu'ils excitent dans les corps le mouvement du fluide igné contenu* ». Marat réalise ensuite ces expériences sur le fluide électrique, pour montrer qu'il est distinct du fluide igné.

Marat conclut de ce qui précède que « *la chaleur, le feu, la flamme, sont produits par un fluide en mouvement, dont les globules ont beaucoup de transparence, de ténuité, de poids, de mobilité & une dureté extrême* ». Mais en quoi consiste ce mouvement ? De l'observation des jets tourbillonnants qui apparaissent dans la chambre obscure au sommet du cylindre entourant la mèche de la bougie allumée, Marat déduit l'existence d'une sphère d'activité, dont le fluide igné occupe le centre, d'où il s'élance de toutes parts. C'est au centre de la sphère d'activité que les chocs entre les globules du fluide igné sont le plus violents, la force répulsive s'exerçant donc vers l'extérieur. Marat réalise des expériences pour caractériser cette sphère d'activité :

Le fluide igné qui s'échappe des corps enflammés ou incandescents, forme, autour d'eux, une sphère d'activité dont l'aire est d'autant plus grande que le volume de ces corps est plus considérable ; mais l'intensité de la chaleur ne s'y déploie pas en raison inverse du carré de la distance des corps d'où il émane ; toujours elle est plus grande dans leur région supérieure que dans toute autre point de leur étendue. Une lame de plomb, extrêmement mince, fond à six lignes au-dessus d'un boulet rougi à blanc, & ne fond pas à trois lignes des côtés. Une allumette s'allume à six pouces du sommet de la flamme d'une chandelle, & ne peut s'allumer à quatre lignes de la base.

La figure de cette sphère d'activité se voit dans la chambre obscure. On y observe qu'elle varie fort des corps enflammés aux corps incandescents. Dans ceux-ci, elle a moins d'étendue, particulièrement au haut, où elle se rétrécit, & paraît suivre leur forme. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer l'image d'une mèche de soufre en flamme à celle d'une plaque de fer ardent de mêmes dimensions, & l'image d'un corps enflammé quelconque à celle d'un anneau, d'un boulet, d'un triangle de métal rougi à blanc.

D'où viennent ces irrégularités ? Une seule expérience va résoudre la question. Lorsqu'on suspend un petit boulet rouge sous un récipient de glaces (dans un récipient de verre), on voit, après plusieurs coups de piston, la sphère d'activité de notre fluide s'étendre d'une manière uniforme autour du boulet.

Or, sous (dans) ce récipient, l'air n'étant plus comprimé par celui du dehors, se met en équilibre avec lui-même, & devient partout d'égale densité, d'égale ressort ; dans un corps également chaud, la force expansive du fluide igné est donc la même en tout sens : ainsi la figure, qu'affecte à l'air libre la sphère du feu, dépend de l'inégale pression de l'air qui environne.

Marat réalise ensuite une expérience dans laquelle il suspend un petit boulet porté au rouge dans un vaisseau de verre relié à une machine pneumatique. C'est alors la partie supérieure du vaisseau qui s'échauffe le plus. Mais si, avant de placer le boulet, le vaisseau est vidé de son air, c'est la partie latérale qui s'échauffe le plus, et si le boulet est placé à égale distance des parties supérieure et latérales, elles acquièrent le même degré de chaleur. « *Dans le vide, cette sphère d'activité s'étend donc d'une manière uniforme autour des corps chauds d'où le fluide igné s'échappe. Lorsque le boulet reste longtemps suspendu, on voit dans la chambre obscure cette sphère s'étendre au-delà des parois du récipient* ». Il en déduit que c'est aux inégalités de pression de l'air qu'est due la forme non sphérique d'une flamme à l'air libre, et réalise avec son microscope solaire des expériences pour décrire la forme de la sphère d'activité de cette flamme. Ces expériences consistent à approcher un poinçon de la flamme jusqu'à ce que « *son ombre touche à l'image des flots de fluide igné qui s'en échappent* ». « *Le feu a besoin d'air ; sans lui il ne peut ni s'allumer ni s'entretenir : car tout combustible avec lequel il n'est pas en contact, ne s'enflamme jamais : si quelques substances semblent faire exception à cette loi générale, c'est qu'elles contiennent l'air nécessaire à leur déflagration* ». Marat teste d'abord l'idée selon laquelle l'air s'oppose à l'expansion du fluide igné par sa pression, en soufflant et aspirant de l'air au voisinage de la flamme, et en réalisant d'autres expériences. « *L'air est aussi nécessaire à l'action du feu, en ce qu'il l'entretient par son ressort* », comme il l'observe en soufflant doucement avec un soufflet sur « *la petite atmosphère qui environne cette flamme vacillante* ». Et, ce qui semble équivalent à la propriété de ressort énoncée précédemment,

« *l'air est encore nécessaire à l'action du feu, en tant qu'il fournit au fluide igné un milieu compressible où il peut librement étendre sa sphère d'activité* ». Introduisant la flamme d'une bougie dans un tube de verre, il constate qu'elle emplit bientôt tout le tube, ce qu'il interprète correctement comme étant dû à la dilatation de l'air échauffé dans le tube. Au contraire, si l'extrémité supérieure du tube est bouchée, « *l'air violemment dilaté par la flamme ne pouvant s'échapper, la comprime violemment à son tour & l'étouffe* ». Il place une bougie dans un vaisseau de verre fermé et constate qu'à mesure de l'échauffement, la sphère d'activité de la flamme se resserre par degrés. Il montre que le détachement et l'élévation de la flamme d'une bougie dans un tube de verre sont dus au fait que la pression de l'air est plus forte dans les couches inférieures. « *Enfin, l'air est nécessaire à l'action du feu, en tant que par son moyen tout le phlogistique des matières inflammables, successivement amené à la superficie* ». Rappelons que pour Marat, le phlogistique est le principe huileux à la base de l'inflammabilité des corps, et non la matière du feu en tant qu'élément, au sens où l'entend par exemple Boerhaave. Et Marat de poursuivre : « *la seule différence essentielle qu'il y ait entre les matières combustibles & les matières incombustibles, c'est que ces dernières contiennent peu ou point de phlogistique, dont les premières abondent* ». Mais, demande-t-il, « *pourquoi le fluide igné s'attache-t-il aux seules matières inflammables ? En vertu d'une affinité particulière entre ses globules & le phlogistique dont ces matières sont saturées* ». Et il remarque que lorsqu'on essaie de détacher du combustible la flamme qui le dévore en la poussant avec un chalumeau, elle ne cède qu'avec résistance, et regagne bientôt l'espace abandonné, ce qui prouve l'affinité précédemment affirmée. « *Ainsi, le phlogistique est l'aliment du feu, en tant qu'il fixe l'action du fluide igné, en vertu d'une attraction particulière* ». Marat mène également des expériences sur le refroidissement des corps chaud, et conclut qu'il se produit au contact de corps moins chaud. Or, « *plus est vif le mouvement-intestin principe de la chaleur, plus il a de force expansive, plus il tend à se communiquer. Or plus ces milieux sont denses, plus ce refroidissement est accéléré ; aussi l'est-il davantage dans l'eau que dans l'air, dans l'air que dans le vide* ». Il mesure les temps de refroidissement d'un boulet chauffé au rouge dans le vide (80 mn), dans l'air (40 mn) et dans l'eau froide (10 secondes). Le fluide igné n'est pas lumineux par lui-même, l'éclat qu'il prend dans la chambre obscure n'étant due qu'aux rayons du soleil qu'il concentre. « *Le feu n'est feu qu'autant que le mouvement des globules ignés est assez vif pour ébranler la matière de la lumière : aussi la lumière & la chaleur sont-elles toujours unies dans ce prétendu élément* ». Marat traite la question de la couleur de la flamme, qu'il relie à la nature des combustibles. Il termine son précis par une explication de la verticalité et de la forme allongée de la flamme, en termes de différentiel de pression entre le bas et le haut.

Ainsi, c'est à une affinité entre les globules du feu et la matière inflammable des corps que Marat attribue la combustion et le feu. Rappelons que pour Lavoisier, « *l'air est composé [...] de la matière du feu comme dissolvant, combinée avec une substance qui lui sert de base* ». C'est pour lui l'affinité entre cette base et les substances combustibles dans les corps qui est responsable de la chaleur et de l'inflammation qui peut en résulter. On voit donc que les globules du feu chez Marat, jouent le rôle de la base chez Lavoisier. Lavoisier, qui est chimiste, va beaucoup plus loin dans l'explication de la combustion, et donnera à la base le nom d'oxygène. Marat, lui, s'intéresse à la matière du feu, et aux atmosphères de feu des corps enflammés, dont il caractérise la structure et la dynamique par un procédé que l'on qualifierait aujourd'hui d'ombroscopie par l'utilisation du microscope solaire, invention alors à la pointe du progrès. Le fluide igné pesant, qui baigne la terre et tous les objets, et passe à travers les pores des corps, est en permanence attiré par le phlogistique contenu dans les corps où, se combinant avec lui, il produit chaleur et flamme, la matière du feu transitant ainsi par les corps enflammés, qui la rejettent vers l'atmosphère. Les variations de poids des métaux à la calcination confirment selon lui la grande quantité de matière ignée impliquée dans le feu, la plus grande partie de cette matière, lors de l'inflammation, provenant de l'extérieur, comme il le dit lui-même. Ainsi, chaque atmosphère de feu est une atmosphère particulière, en échange permanent avec l'atmosphère de feu globale, enveloppe éthérée de la terre. L'approche expérimentale de Marat, qui, exploitant une technique alors nouvelle, réalise avec soin un très grand nombre d'expériences dans sa chambre noire, est tout-à-fait caractéristique de l'importance que prend l'expérimentation au XVIII^{ème} siècle. Ses résultats sur les propriétés du fluide igné sont bien sûr d'une importance toute relative en eux-mêmes, voire contradictoires, mais sa caractérisation géométrique de la flamme, et de sa sphère d'activité, est indiscutablement intéressante.

Les figures observées sont, dans le cas où le fluide igné est pur (sans produits de combustion, par exemple par chauffage d'un morceau de métal), dues à la réfraction des rayons solaires par l'air chaud turbulent, explication qui n'entre pas dans le cadre de pensée de Marat en la matière, et dont il ne dit mot. Ces figures sont selon lui le fait de la concentration des rayons du soleil par le fluide igné. Or, un siècle plus tôt, dans l'Observation XVIII de ses *Micrographia* (1663), Hooke décrit précisément le phénomène d'inflexion de la lumière, auquel il attribue les ondulations vues sur la surface des corps lumineux, comme le soleil et la lune, sur l'horizon, ou une bougie dans la nuit. Pour lui, « *la vraie cause de tous ces phénomènes est due à*

l'inflexion, ou la réfraction multipliée des rayons de lumière au sein du corps de l'atmosphère, et [elle] ne procède pas de la réfraction sur des surfaces terminales au sommet de l'air, ni par des surfaces exactement définies dans le corps de l'atmosphère ». Cette conclusion est basée sur deux propositions, à savoir, « *premièrement, qu'un milieu dont les parties sont inégalement denses, et mues par des mouvements variés et des transpositions des unes aux autres, produit tous les effets qu'on voit sur les rayons de lumière, sans aucune autre cause co-efficente ; deuxièmement, qu'il y a dans l'air ou l'atmosphère une grande variété dans ses parties constituantes, à la fois en termes de densité et de rareté, et de mutations et positions réciproques* ». Hooke donne comme une des preuves de cette propriété de l'air d'infléchir les rayons de lumière que « *les parties de l'air sont pour certaines plus condensées, pour les autres plus raréfiées, soit à cause d'un degré de chaleur différent, soit à cause d'une pression exercée différente, soit à cause de quelques vapeurs hétérogènes dispersées en son sein* ». Il peut paraître surprenant que Marat ne fasse aucune allusion à la réfraction de la lumière et n'établisse pas un parallèle entre ses observations et les ondulations des objets vus à travers l'atmosphère au-dessus d'un champ brûlé par le soleil, les mécanismes sous-jacents de la réfraction atmosphérique étant identifiés et compris depuis plus d'un siècle quand il réalise ses expériences.

4. Conclusion

La question de l'atmosphère des corps terrestres est au cœur du lien qui unit matières subtiles, atmosphère et corps poreux au XVIII^{ème} siècle. La circulation de la matière subtile, et des vapeurs plus épaisses, dans les corps, à l'origine d'une atmosphère propre de ces corps, en échange perpétuel avec l'atmosphère globale de la terre et l'éther, constitue un phénomène essentiel, expliquant depuis la combustion jusqu'au caractère odoriférant des corps, en passant par les mécanismes du gel. Bien que souvent inexacts dans le détail, au regard des connaissances d'aujourd'hui, les diverses conceptions qui s'expriment donnent l'image d'un monde étroitement interconnecté, corps solides, atmosphères des corps solides et atmosphère globale constituant des milieux en interaction permanente les uns avec les autres (on parlerait aujourd'hui de système dynamique multi-échelle) via de nombreux processus physiques, dont certains, comme la combustion, sont encore très mal compris à l'époque. L'importance de savants comme Hooke, Boyle ou Mariotte au XVII^{ème} siècle, ou encore Nollet, Mairan, ou Musschenbroek, puis bien sûr Lavoisier, au XVIII^{ème} siècle, tous à la fois expérimentateurs et théoriciens de leurs disciplines, apparaît clairement à travers ce thème, comme on dirait

aujourd'hui « transversal » aux sciences de l'atmosphère et à la physique du solide. Le terme « atmosphère » acquiert ici un sens plus général que celui d'atmosphère terrestre, la terre n'étant finalement qu'un corps particulier parmi d'autres, et son atmosphère une atmosphère particulière parmi d'autres, toutes immergées dans une atmosphère commune.

Conclusion

Nous nous sommes attachés, tout au long de ce livre, à retracer le fil de la découverte progressive de l'atmosphère, et de ses propriétés, tout au long des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles. En à peine plus d'un siècle, depuis la découverte du caractère pesant de l'air au milieu du XVII^{ème} siècle, jusqu'à la conception de systèmes élaborés de l'aurore boréale, ou à la découverte de l'électricité atmosphérique, au milieu du siècle suivant, l'atmosphère est passée du statut d'objet purement mathématique, caractérisé par son interaction, par réflexion ou réfraction, avec la lumière des astres, à celui d'objet physique complexe, composé de nombreuses matières, grossières ou subtiles, et siège de multiples phénomènes météorologiques, que les savants s'efforcent de comprendre et de relier entre eux. Nous avons choisi comme fil directeur de notre propos celui de la quête du sommet de l'atmosphère, car la question de la hauteur de l'atmosphère, et des incohérences qui se dégagent des différentes méthodes utilisées alors pour l'estimer, nous semble constituer un moteur puissant de l'évolution de la pensée scientifique de l'époque dans ce domaine. Ce choix nous a naturellement conduit à aborder la question sous l'angle des diverses matières subtiles imaginées alors pour expliquer et accorder entre elles les différentes estimations de la hauteur, matières pour l'essentiel issues de l'héritage cartésien, dont la riche palette permet aux savants de l'époque d'atteindre une représentation relativement cohérente de l'atmosphère et de ses interactions au milieu du XVIII^{ème} siècle. L'étude des matières subtiles nous entraîne de fait sur le terrain de la physique, qu'il s'agisse de physique solaire et cométaire, de magnétisme terrestre, d'électricité atmosphérique, d'optique, d'hydrostatique, de physique des milieux poreux, etc..., autant de domaines dont nous dévoilons au fil de notre itinéraire quelques aspects particuliers, en totalité ou pour partie reliés à la question de l'atmosphère, et de sa hauteur. À l'idée d'une atmosphère présentant une hauteur unique et déterminée, qui prévaut au début du XVII^{ème} siècle, se substitue peu à peu, dans le courant du XVIII^{ème} siècle, au fil des contradictions qui apparaissent et des systèmes inventés pour les résoudre, l'idée d'une atmosphère multi-hauteur, stratifiée en fonction de phénomènes particuliers observés à telle ou telle altitude, replacés les uns vis-à-vis des autres sur l'échelle verticale en fonction d'une représentation physique globale cohérente de l'atmosphère. La découverte par vol ballon, au début du XIX^{ème} siècle, de la décroissance régulière, jusqu'à des altitudes élevées, de la température atmosphérique, va considérablement modifier la représentation de l'atmosphère, et de sa hauteur, mais c'est une autre histoire...

Références

- ALLAMAND, *Note sur une lettre de Mr. Trembley au Président de la Société Royale renfermant quelques-unes des observations de Mr Allamand sur l'Électricité*, Bibliothèque Raisonnée des Ouvrages des Savants de l'Europe, Tome quarante, Amsterdam, J. Wetstein, 1748, p. 183.
- AMONTONS, Guillaume, *De la hauteur du mercure sur les baromètres ; Suite des remarques sur la hauteur du mercure dans les baromètres*, MARS 1705 (1730), p. 229-272.
- ARAGO, François, *Quels ont été les premiers observateurs des taches solaire ?*, Astronomie Populaire, Tome deuxième, chapitre VIII, Paris, Gide et J. Baudry, Leipzig, T.O. Weigel, 1855.
- ARAGO, François, *Tycho-Brahé, Kepler*, Notices biographiques, Tome troisième, Oeuvres de François Arago, Paris, Gide et J. Baudry, Leipzig, T.O. Weigel, 1855, p. 186-240.
- ARIOTTI, Piero E., *A little known early seventeenth century treatise on vision: Benedetto Castelli's Discorso sopra la Vista (1639, 1669)*, Annals of Science, 30:1 (1973), p. 1-30.
- The Aurora Borealis, or Northern Lights*, An Historical Miscellany of Curiosities and Rarities in Nature and Art, Volume the Third, London, Champante and Whitrow, 1794, p. 40-49.
- AUZOUT, Adrien, *Extrait d'une lettre de Monsieur Auzout, du 28 décembre 1666. À M. Oldembourg Secrétaire de la Société Royale d'Angleterre ; Manière exacte pour prendre le diameter des planètes, la distance entre les petites étoiles, la distance des lieux, &c.*, Paris, Jean Cusson, 1667, p. 2-15..
- BACON, Roger, *Chapter VI*, The Opus Majus (1267), A translation by Robert Belle Burke, Volume II, New York, Russell and Russell Inc., 1962, p. 532-534.
- BAILLY, Jean-Sylvain, *Histoire de l'Astronomie Moderne depuis la fondation de l'École d'Alexandrie, jusqu'à l'époque de M. D. CC. XXX.*, Tome Second, Paris, Frères de Bure, 1779.
- BARKER, Peter, *Jean Pena (1528-58) and stoic physics in the sixteenth century*, The Southern Journal of Philosophy, Vol. XXIII, Supplement (1985), 93-107.
- BEECH, Martin, *Halley's meteoritic hypothesis*, The Astronomy Quarterly, Vol. 7 (1990), p. 3-18.
- BÉRAUD, Laurent, *Dissertation sur le rapport qui se trouve entre la cause des effets de l'aimant et celle des phénomènes de l'électricité*, Bordeaux, Pierre Brun, 1748.

- BERGMAN, Torbern, *Of Air CCLXXVIII, An essay on the usefulness of chemistry and its application to the various occasions of life*, London, J. Murray, 1783, p. 130-163.
- BERKELEY, George, *An essay towards a new theory of vision*, the Second Edition, Dublin, Jeremy Pepyat, 1709.
- BERNIER, François, *Chapitre XV. Que l'on peut trouver le moyen de faire un vide considérable*, Abrégé de la philosophie de Gassendi, Seconde Edition, Tome II, Lyon, Anisson, Posuel et Rigaud, 1684, p. 190-208.
- BERNOULLI, Jean, *Nouveau phosphore ; Lettre de M. Bernoulli, Professeur à Groningue, touchant son nouveau Phosphore*, MARS 1701 (1743), p. 1-9, 137-148.
- BERNOULLI, Jean, *Nouvelle manière de rendre les baromètres lumineux*, MARS 1700 (1761), p. 178-190.
- BERNOULLI, Daniel & BERNOULLI, Jean, *Nouveaux principes de mécanique et de physique tendant à expliquer la nature & les propriétés de l'aimant*, Paris, Martin, Coignard et Guérin 1748.
- BERTHOLON, Pierre, *De l'électricité des météores, Tome premier*, Lyon, Bernuset, 1787.
- BERTHOLON, Pierre, *De l'électricité des météores, Tome second*, Paris, Croullebois, 1787.
- BIOT, Jean-Baptiste, *Considérations sur la nature et les causes de l'Aurore boréale*, Journal des Savans (1820), p. 342-354.
- BIOT, Jean-Baptiste, *Détails historiques sur le Rev. John Flamsteed, le premier astronome royal, rédigé sur ses propres manuscrits et d'après d'autres documents authentiques encore inédits, auxquels on a joint son Catalogue Britannique des Étoiles, corrigé et augmenté*, troisième article, Journal des Savants, novembre 1836, p. 641-658.
- BIOT, Jean-Baptiste, *Sur la théorie des réfractions atmosphériques*, CRAS, Tome trente-neuvième (1854), p. 708-721.
- BIRKELAND, Kristian, *The Norwegian Aurora Polaris Expedition, 1902-1903*, Volume 1, Christiana, Aschehoug & Co, Leipzig, Johann Ambrosius Barth, London, New-York, Longmans, Green & Co, Paris, C. Klincksieck, 1908.
- BLAGDEN, Charles, *An account of some late fiery meteors ; with observations*, In a letter from Charles Blagden, M.D. Physician to the Army, Sec. R.S. to Sir Joseph Banks, Bart. P.R.S., Phil. Trans. Roy. Soc. 74 (1784), p. 203-232.
- BOUGEREL, Joseph, *Vie de Pierre Gassendi*, Paris, Jacques Vincent, 1737.
- BOUGUER, Pierre, *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*, Paris, Claude Jombert, 1729.
- BOULENGER, Jean, *Traité de la Sphère du Monde*, Paris, Jean Moreau, 1628.

- BOURDELOT, Pierre Michon, *Extrait d'une lettre écrite par Monsieur l'Abbé B..... au Sieur Denis, pour être lue dans son Assemblée ; Touchant la grandeur apparente de la lune, auprès de l'Orizon*, Journal des Savans 1672, Amsterdam, Pierre Le Grand, 1682, p. 254-261.
- BOURGUET, Louis, *Article VII. Essai d'une nouvelle théorie sur la vision de Mr. George Berkeley*, Bibliothèque italique ou histoire littéraire de l'Italie, tome treizième, Genève, Marc-Michel Bousquet & Compagnie, 1732, p. 182-227.
- BOYLE, Robert, *The atmospheres of consistent bodies*, The works of the honourable Robert Boyle, in three volumes (1669), by Peter Shaw M.D., London, W. Innys and R. Manby, and T. Longman, p. 397-402, 1738.
- BOYLE, Robert, *A Continuation of New Experiments Physico-Mechanical, Touching the spring and weight of the air, and their effects, The I. Part*, Oxford, Henry Hall, 1669, p. 139-141.
- BOYLE, Robert, *The mechanical production of magnetism*, The Philosophical Works of the Honourable Robert Boyle, by Peter Shaw, M.D., The Second Edition Corrected, London, W. Innys, R. Manby, T. Longman, 1738, p. 496-505.
- BOYLE, Robert, *An Essay of the Porousness of Solid Bodies*, The works of the honourable Robert Boyle, in six volumes (1684), London, W. Johnston, S. Crowder, T. Payne, G. Kearsley, J. Robson, B. White, T. Becket and P. A. De Hondt, T. Davies, T. Cadell, Robinson and Roberts, Richardson and Richardson, J. Knox, W. Woodfall, J. Johnson, and T. Evans, p. 1777-1793, 1772.
- BRUZEN LA MARTINIÈRE, Antoine-Augustin, *Dictionnaire géographique et critique, Tome premier, entrée Atmosphère*, La Haye, P. Gosse, R.C. Alberts, P. De Hondt ; Amsterdam, Herm Huytwerf & Franç. Changuion ; Rotterdam, Jean Daniel Beman, 1726.
- BRYDONE, Patrick, *A Letter from Patrick Brydone ; to Sir John Pringle, containing an Account of a fiery Meteor seen on the 10th of February last; and also of some new electrical Experiments*, Phil. Trans. Roy. Soc. 63 (1772), p. 163-170.
- CASSINI, Jean-Dominique, *Abrégé des observations et des réflexions sur la comète*, Paris, Estienne Michallet, 1681.
- CASSINI, Jean-Dominique, *Découverte de la lumière céleste qui paraît dans le zodiaque*, Recueil d'Observations faites en plusieurs voyages par ordre de Sa Majesté pour perfectionner l'astronomie et la géographie, Paris, Imprimerie Royale, 1693.
- CASSINI, Jean-Dominique, *Réflexions sur les observations faites en Botnie*, MARS 1700 (1761), p. 39-47.

- CASSINI, Jean-Dominique, *Réflexions sur la comète qui a paru vers la fin de l'année 1707*, MARS 1708 (1730), p. 89-101.
- CASSINI, Jean-Dominique, *Vie de J.-D. Cassini, écrite par lui-même, Troisième partie : anecdotes de la vie de J.-D. Cassini*, Mémoires pour servir à l'Histoire des Sciences et à celle de l'Observatoire Royal de Paris, suivi de la vie de J.-D. Cassini, écrite par lui-même, et des Éloges de plusieurs Académiciens morts pendant la Révolution, Paris, De Jombert, 1810, p. 255-312.
- CASSINI, Jacques, *De la Réfraction de l'air, faite par l'ordre de la Société Royale d'Angleterre* (avec une traduction de l'article de J. Lowthorp paru dans les Phil. Trans. de 1699), MARS 1700 (1706), p. 100-107.
- CASSINI, Jacques, *Réflexions sur la hauteur du baromètre observée sur diverses montagnes*, MARS 1733 (1735), p. 40-48.
- CASSINI, Jacques, *De la révolution du soleil et des planètes autour de leur axe*, MARS 1735 (1738), p. 453-464.
- CASSINI, Jacques, *De la Comète qui a paru aux mois de Février de Mars et d'Avril de cette année 1737*, MARS 1737 (1740), p. 170-182.
- CAVENDISH, Henry, *On the Height of the luminous Arch which was seen on Feb. 23, 1784*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 80 (1790), p. 101-105.
- CHLADNI, Ernst, *Réflexions Sur l'origine de diverses Masses de fer natif, et notamment de celle trouvée par Pallas, en Sibérie*, Journal des Mines 88 (1803), p. 286-320.
- CHLADNI, Ernst, *Suite des Réflexions Sur l'origine de diverses Masses de fer natif, et notamment de celle trouvée par Pallas, en Sibérie*, Journal des Mines 90 (1803), p. 446-485.
- CLAP, Thomas, *Conjectures upon the nature and motion of meteors*, Norwich, Connecticut. J. Trumbull, 1781.
- CLARKE, Samuel, *A Letter to Mr. Dodwell*, the Sixth Edition, London, James and John Knapton, 1731.
- COTTE, Louis, *Chapitre 1^{er} De l'atmosphère*, Traité de météorologie, Paris, Imprimerie Royale, 1774, p. 3-12.
- COTTE, Louis, *Cinquième mémoire sur l'électricité naturelle de l'atmosphère*, Mémoires sur la Météorologie, pour servir de suite et de supplément au Traité de Météorologie publié en 1774, Paris, Imprimerie Royale, 1788, p. 174-320.

- COTTE, Louis, *Neuvième mémoire, sur l'aurore boréale*, Mémoires sur la Météorologie, pour servir de suite et de supplément au Traité de Météorologie publié en 1774, Paris, Imprimerie Royale, 1788, p. 320-366.
- COULVIER-GRAVIER, Rémi Armand, SAIGEY, Émile, *Recherches sur les étoiles filantes*, Paris, Alger, Hachette et C^{ie}, 1847
- CZEGKA, Wolfgang, *Wilhelm Schickard (1592-1635), Isaac Habrecht (15??-1633) and their meteor observation in 1623. - Europe's first "exact" empirical meteor height determination*, 62nd Annual Meteoritical Society Meeting, Meteoritics and Planetary Sciences 34, (1999), p. A29-A30.
- D'AVITY, Pierre, *Le Monde*, Paris, Claude Sonnius & Denys Bechet, 1643.
- DALTON, John, *On the height of the Aurora Borealis above the surface of the earth, particularly one seen on the 29th of March, 1826*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 118 (1828), p. 291-302.
- DAME, Bernard, *Galilée et les taches solaires (1610-1613)*, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications 19, 4 (1966), p. 307-370.
- DELUC, Jean André, *Chapitre Second. Application à la mesure des hauteurs par le baromètre, à la détermination de la hauteur totale de l'atmosphère. Essais sur les atmosphères en général*, Recherche sur les modifications de l'atmosphère, Paris, Veuve Duchesne, 1784, p. 7-17.
- DELAMBRE, Jean-Baptiste, *Histoire de l'astronomie moderne*, Paris, M^{me} V^e Courcier, 1821.
- DERHAM, William, *Experiments about the Motion of Pendulums in Vacuo*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 294 (1704), p. 1785-1789.
- DEROZIERES, Pilatre, *Réflexions, Sur la cause de la foudre*, Observations sur la Physique, sur l'Histoire Naturelle et sur les Arts, par M. l'Abbé Rozier, & par M.J.A. Mongez, Tome XVI, 1780, p. 309-311.
- DESAGULIERS, Jean-Théophile, *Essai Pour expliquer à la faveur d'une Expérience pourquoi le Diamètre de la Lune paraît plus grand lorsqu'elle est à l'Horizon, que quand elle est élevée de quelques degrés au-dessus ; Expérience, Faite au mois de mai 1735, en confirmation de celle qui avait été donnée dans un mémoire daté du 30 janvier 1735, touchant la différente grandeur du Diamètre de la Lune à l'Horizon & au-dessus de l'Horizon*, Transactions Philosophiques de la Société Royale de Londres 1736 (1738), Traduites par M. de Brémond, Paris, Piget, p. 268-274.
- DESCARTES, René, *La Dioptrique* (1637), Œuvres de Descartes, Tome V, Texte établi par Victor Cousin, Paris, F. G. Levrault, Wikisource, 1824.

- DESCARTES, René, *Les météores* (1637), Œuvres de Descartes, Tome V, Texte établi par Victor Cousin, Paris, F. G. Levrault, 1824.
- DESCARTES, René, *Les Principes de la Philosophie de René Descartes* (1644), Quatrième édition, Paris, Théodore Girard, 1681, p. 202-208, 334-336.
- Dictionnaire de physique*, éd. Gaspard Monge, Jean-Dominique Cassini, Pierre-Nicolas Bertholon, Tome premier, Paris, Hôtel de Thou, rue des Poitevins, 1793.
- DUFAY, Charles François de Cisternay, *Mémoires sur l'électricité*, MARS 1733 (1735), p. 23-35, 73-84, 233-254, 457-476.
- DUFAY, Charles François de Cisternay, *Mémoire sur les baromètres lumineux*, MARS 1723 (1753), p. 295-306.
- DUFAY, Charles François de Cisternay, *Observations sur quelques expériences de l'aimant*, MARS 1728 (1753), p. 355-369.
- DUFAY, Charles François de Cisternay, *Suite des observations sur l'aimant*, MARS 1730 (1732), 142-157.
- DUFAY, Charles François de Cisternay, *Troisième mémoire sur l'aimant*, MARS 1731 (1764), 417-432.
- DUTOUR, Etienne-François, *Discours sur l'Aiman*, Paris, G. Martin, J. B. Coignard, & les Frères Guérin, 1748.
- Encyclopædia ; or, a Dictionary of Art, Sciences, and Miscellaneous Literature*, Vol. II., Philadelphia, Thomas Dobson, 1798, p. 692-698.
- Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers, par une Société de Gens de Lettres*, éd. Denis Diderot et Jean Le Rond D'Alembert, Briasson, David, Le Breton, Durand, Paris, puis Faulche et compagnie, Neufchastel, 28 t., 1751-1772.
- Encyclopédie méthodique. Physique*, éd. Gaspard Monge, Jean-Dominique Cassini, Pierre-Nicolas Bertholon, Jean-Henri Hassenfratz, Tome Second à Quatrième, Paris, Mme Veuve Agasse, 1816-1822.
- ENRIGHT, Jim T., *The Moon Illusion Examined from a New Point of View*, Proceedings of the American Philosophical Society 119, 2 (1975), p. 87-107.
- L'Esprit des Journaux français et étrangers. Par une société de gens-de-lettres, *Lettres physico-météorologiques des célèbres physiciens Senebier, de Saussure & Toaldo, avec les réponses d'Antoine-Marie Vassalli, professeur de philosophie au collège royal de Tortone*, Tome III, Paris, Veuve Valade, mars 1791, p. 157-171.

- Étoile tombante*, Nouveau dictionnaire, pour servir de supplément aux dictionnaires des arts, des sciences et des métiers, par une société de gens de lettres, Tome second, Paris, Panckoucke, Stoupe, Brunet, Amsterdam, M. M. Rey, 1776, p. 898-899.
- EULER, Leonhard, *Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie* (1762), Paris, Charpentier Libraire Editeur, 1843, p. 578-603.
- EULER, Leonhard, *Recherches Physiques sur la cause de la queue des comètes, de la lumière boréale, et de la lumière zodiacale*, Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin (1746), p. 117-140.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Diverses observations de physique générale. I.*, HARS 1700 (1761), p. 8-10.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Sur la comète de 1707 et sur les comètes en général*, HARS 1708 (1730), p. 97-104.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Sur le phosphore du baromètre*, HARS 1704 (1745), p. 1-8.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Sur une irrégularité de quelques baromètres*, HARS 1705 (1730), p. 16-21.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Sur les réfractions*, HARS 1706 (1731), p. 101-103.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Sur les réfractions astronomiques*, HARS 1714 (1717), p. 61-67.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Sur l'Aïman*, HARS, 1733 (1735), p. 13-22.
- FONTENELLE, Bernard le Bovier de, *Sur les rotations des corps célestes*, HARS 1735 (1738), p. 41-46.
- FORSTER, George, *Cf chap. IV. Run from the Cape to the Antarctic Circle ; first season spent in high Southern Latitudes. – Arrival on the Coast of New Zealand*, Voyage round the world, London, B. White, J. Robson, P. Elmsly, G. Robinson, 1777, p. 86-122.
- FOUCHY, Jean-Paul Grandjean de, *Sur l'aurore boréale*, HARS 1747 (1752), p. 32-51.
- FURETIERE, Antoine, Dictionnaire Universel, Contenant généralement tous les mots français, tant vieux que modernes, & les Termes de toutes les Sciences et des Arts, La Haye & Rotterdam, Arnoud & Reinier Leers, 1690-1701.
- FURETIERE, Antoine, Dictionnaire Universel, Contenant généralement tous les mots français, tant vieux que modernes, & les Termes de toutes les Sciences et des Arts, Ensuite corrigé et augmenté par M. Basnage de Beauval, et en cette nouvelle édition, revu, corrigé & considérablement augmenté par M. Brutel de la Rivière, La Haye, Pierre Husson, Thomas Johnson, Jean Swart, Jean Van Duren, Charles Le Vier, la Veuve Van Dole, 1727.

- FRANKLIN, Benjamin, *Suppositions and Conjectures towards forming an Hypothesis, for the explanation of the Aurora Borealis*, Political, Miscellaneous, and Philosophical Pieces, London, J. Johnson, 1779, p. 504-530.
- GADROYS, Claude, *Chapitre III. De la grandeur apparente du Soleil & de la Lune dans l'Horizon & dans le Méridien*, Le système du Monde selon les trois hypothèses, Paris, Guillaume Desprez, 1675, p. 401-407.
- GASSENDI, Pierre, *Du Mouvement (1642)*, Abrégé de la Philosophie de Gassendi, par François Bernier, Seconde Edition, Tome II, Livre II, Lyon, Anisson, Posuel & Rigaud, 1684, p. 275-303.
- GASSENDI, Pierre, *Des Pierres, & des Métaux, Cf chap. III. De l'Aïman, & de ses propriétés selon les Anciens, Cf chap. IV. Des choses qu'on a depuis quelque temps observées dans l'Aïman (1649)*, Abrégé de la Philosophie de Gassendi, par François Bernier, Tome V, Livre III, Lyon, Anisson, & Posuel, 1678, p. 271-309.
- GAY-LUSSAC, Joseph Louis, ARAGO, François, *Aurores boréales en 1825*, Annales de chimie et de physique, Tome trentième, Paris, Crochard, 1825, p. 423-427.
- GOLDSTEIN, Bernard R., *Ibn Mu^c ādh's Treatise On Twilight and the Height of the Atmosphere*, Archive for History of Exact Sciences 17, 2 (1977), p. 97-118.
- GOLDSTEIN, Bernard R., *Refraction, twilight, and the height of the atmosphere*, Vistas in Astronomy 20 (1976), p. 105-107.
- HALLEY, Edmond, *Extrait d'un Discours de Mr. Halley contenu dans le journal d'Angleterre, du mois de Mai 1686. Des règles que l'on peut donner de la hauteur du Vif argent, dans le Baromètre, selon que les lieux sont plus, ou moins élevés sur la surface de la terre ; avec une conjecture touchant la raison pour laquelle le Mercure monte & descend selon le changement des saisons*, Bibliothèque universelle et historique de l'année M. D. C. LXXXVI., Tome second, Amsterdam, Wolfgang, Waesberge, Boom, & Van Someren, 1687.
- HALLEY, Edmond, *A theory of the variation of the magnetical compass*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 13, 148 (1683), p. 208-221.
- HALLEY, Edmond, *A discourse concerning gravity, and its properties, wherein the descent of heavy bodies, and the motion of projects is briefly, but fully handled : together with the solution of a problem of great use in gunnery*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 16, 179 (1687), p. 3-21.

- HALLEY, Edmond, *An Account of the cause of the change of the variation of the magnetic needle. with an hypothesis of the structure of the internal parts of the earth: as it was proposed to the Royal Society in one of their late meetings*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 17, 195 (1692), p. 563-573.
- HALLEY, Edmond, *Astronomiæ cometiciæ synopsis*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 24, 297 (1705), p. 1882-1899.
- HALLEY, Edmond, *An account of several extraordinary Meteors or Lights in the Sky*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 29, 341 (1714), p. 159-164.
- HALLEY, Edmond, *An Account of the late Surprising Appearance of the Lights seen in the Air, on the sixth of March last, with an Attempt to explain the Principal Phænomena thereof*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 29 (1717), London, W. Innys, p. 406-428.
- HALLEY, Edmond, *An Account of the Extraordinary METEOR Seen all over England, on the 19th of March 1718/19. With a Demonstration of the uncommon Height thereof*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 30, 360 (1719), p. 978-990.
- HALLEY, Edmond, *Some remarks on the allowances to be made in astronomical observations of the refraction of the air*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 31, 368 (1721), p. 169-172.
- HARRIS, John, *Lexicon Technicum, or, An Universal English Dictionary of Arts and Sciences : Explaining not only the Terms of Art, but the Arts Themselves*, London, Dan. Brown, Tim. Goodwin, John Walthoe, Tho. Neuborough, John Nicholson, Tho. Benskin, Benj. Tooke, Dan. Midwinter, Tho. Leigh, and Francis Coggan, 1704.
- HARTSOEKER, Nicolas, *Chapitre VII. De la vision ; Chapitre X. Des observations faites avec des lunettes d'approche, & avec des microscopes*, Essai de Dioptrique, Paris, Jean Anisson, 1694, p. 79-91, 179-233.
- HARTSOEKER, Nicolas, *De la nature et des propriétés de l'aimant*, Cours de physique, Livre troisième, Chapitre V, 1707, p. 191-226.
- HARTSOEKER, Nicolas, *Suite des conjectures Physiques*, p. 137-143, 1708.
- HARTSOEKER, Nicolas, *Remarques sur deux Passages d'une Thèse que M. Bernoulli a fait soutenir à Bâle par un certain Nebel son Ecolier*, Cours de Physique, La Haye, Jean Swart, 1730, p. 94-101.
- HARTSOEKER, Nicolas, *De la réfraction et de la réflexion des rayons de lumière*, Cours de physique, Chapitre III, La Haye, Jean Swart, 1730, p. 86-121.

- HAUKSBEE, Francis, *Experiments on the Resilition of Bodies in Common Air, in Vacuo and in air condens'd, made at a meeting of the Royal Society at Gresham College*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 24, 298 (1705), p. 1946-1948.
- HAUKSBEE, Francis, *Several Experiments on the Mercurial Phosphorus made before the Royal Society at Gresham College*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 24, 303 (1705), p. 2129-2135.
- HAUKSBEE, Francis, An account of an experiment made before the Royal Society at Gresham College, together with a repetition of the same, touching the production of a considerable light upon a slight attrition of the hands on a glass globe exhausted of its air : with other remarkable occurrences, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 25, 307 (1706), p. 2277-2282.
- HELVETIUS, Jean-Claude-Adrien, *Principes de Physique à l'usage des Etudiants en Médecine*, Note de lecture, Journal des Savans, Tome CLXVI, Paris, Veuve Quillau, 1753, p. 14-113.
- HENRION, Denis, *Cosmographie ou traité général des choses tant célestes qu'élémentaires*, Paris, Abraham Pacard, 1620.
- HEUSINGER, Jean-Michel, *Dissertation sur le Phosphore Mercuriel, ou sur la lumière que jette le vif-argent dans l'obscurité*, Note de lecture, Journal des Savans, Paris, Pierre Witte, 1717, p. 184-189.
- HOOKE, Robert, *Of the standing of the Mercury in the Tube to the Height of 75 Inches* (1684), The posthumous works of Robert Hooke, London, Sam. Smith and Benj. Walford, 1705, p. 365-370.
- HOOKE, Robert, *Observations VI, XVI, XVIII*, Micrographia, London, John Martyn, p. 10-32, 100-106, 217-240, 1667.
- HUYGENS, Christian, *Extrait d'une lettre de M. Hugens de l'Académie Royale des Sciences à l'Auteur de ce journal, touchant les phénomènes de l'eau purgée d'air*, Journal des Savans, 1672, p. 133-140.
- HUYGENS, Christiaan, *Le Magnétisme* (1680), Œuvres complètes, Tome dix-neuvième, Mécanique théorique et physique, La Haye, Martinus Nijhoff, 1937, p. 557-603.
- HUYGENS, Christian, *Discours de la Cause de la Pesanteur*, Leide, Pierre Vander, 1690, p. 125-180.
- HUYGENS, Christian, *Traité de la lumière*, Leide, Pierre Vander, 1690, p. 1-124.

- JULLIEN, Vincent, *Le chemin de la lumière chez Newton et chez Leibniz*, Bulletin de la société d'études anglo-américaines des XVII^e et XVIII^e siècles, N°34, Éducation et savoir, Regard et vision, 1992, p. 147-168.
- KAUFMAN, Lloyd, ROCK, Irvin, *The Moon Illusion Thirty Years Later*, In the Moon illusion, Hersenson, M., Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1989, p. 193-235.
- KRONK, Gary W., *Meteor showers, An annotated catalog*, Second Edition, New York, Heidelberg, Dordrecht, London, Springer, 2014.
- LACEPEDE, Bernard-Germain de, *Essai sur l'électricité naturelle et artificielle*, Tomes premier et second, Paris, Imprimerie de Monsieur, 1781.
- LA GRANGE, Jean-Baptiste de, *Les Principes de la Philosophie Contre les nouveaux Philosophes, Descartes, Rohault, Regius, Gassendi, Le P. Maignan, &c*, Paris, Georges Josse, 1684.
- LA HIRE, Philippe de, *Dissertation sur les differens accidents de la Vue*, Mémoires de mathématique et de physique, Paris, Imprimerie Royale, 1694, p. 233-238.
- LA HIRE, Philippe de, *Examen de la ligne courbe, formée par un rayon de lumière qui traverse l'atmosphère*, MARS 1702 (1743), p. 52-59.
- LA HIRE, Philippe de, *Observations de la Quantité d'eau de pluie qui est tombée à l'Observatoire pendant l'année dernière 1705, & de la hauteur du Thermomètre & du Baromètre*, MARS 1706 (1731), p. 1-6.
- LA HIRE, Philippe de, *Sur la hauteur de l'atmosphère*, MARS 1713 (1739), p. 53-64.
- LA HIRE, Philippe de, *Explication de l'anneau lumineux Qui paraît autour du disque de la Lune dans les Éclipses de Soleil qui sont totales*, MARS 1715 (1761), p. 161-165.
- LA HIRE, Philippe de, *Remarques sur les observations des réfractions tirées du livre intitulé Refractio Solis inoccidui in Septentrionalibus oris, juffu Caroli XI. Regis Suevorum , c. à Joanne Bilberg Holmiae*, MARS 1700 (1761), p. 37-38.
- LA LANDE, Jérôme de, *Livre vingtième : de la rotation des planètes*, Astronomie, Tome Second, Paris, Desaint & Saillant, 1764, p. 1203-1222.
- LA LANDE, Jérôme de, *La Lumière Zodiacale*, Astronomie, Tome Premier, Paris, Veuve Desain, 1771, p. 333-337.
- LA LANDE, Jérôme de, *Des crépuscules*, Astronomie, Seconde Édition, Tome Second, Paris, Veuve Desaint, 1771, p. 717-719.
- LA LANDE, Jérôme de, *Livre douzième : Des réfractions astronomiques*, Astronomie, Troisième Édition, Tome Second, 1792, p. 532.

- LAMARCK, Jean-Baptiste de, *De l'air et de ses qualités essentielles, Recherche sur les causes des principaux faits physique*, Tome Premier, Paris, Maradan, 1776, p. 39-47.
- LAMBERT, Jean-Henri, *Sur la vitesse du son*, Collection Académique, Paris, Pancoucke, 1774, p. 306-313.
- LAMBERT, Jean-Henri, *Sur la densité de l'air*, Observations sur la Physique, sur l'Histoire Naturelle et sur les Arts, Paris, Bureau du journal de physique, 1781, p. 126-141.
- LAPLACE, Pierre-Simon de, *Chapitre Premier. Des réfractions astronomiques*, Œuvres complètes, Tome Quatrième, Gauthier-Villars, Livre X, 1805, p. 233-277.
- LAPLACE, Pierre-Simon de, *De l'atmosphère terrestre et des réfractions astronomiques*, Exposition du Système du Monde (1796), Sixième Édition, Paris, Bachelier, 1835, p. 55-62 (wikisource).
- LAUSBERG, André, MOREAU, Olivier, *Les illusions de la pleine lune – II*, Le Ciel (2003), p. 47-54.
- LAVOISIER, Antoine Laurent, *Mémoire sur la combustion en général*, MARS 1777 (1780), p. 592-600.
- LE CAT, Claude Nicolas, *Traité des Sens*, Nouvelle édition, Amsterdam, J. Wetstein, 1744, p. 247-268.
- DUC DU MAINE, Louis Auguste de Bourbon, *Lettres écrites à un philosophe sur le choix d'une hypothèse propre à expliquer les effets de l'aimant*, Mémoires pour l'histoire des sciences et des beaux-arts, Tome sixième, Amsterdam, Jean-Louis Delorme, 1703, p. 367-374.
- LE GARS, Stéphane, *Dortous de Mairan et la théorie des aurores polaires : trajectoire et circulation d'une idée, de 1733 à 1933*, Revue d'histoire des sciences, 68 (2015), p. 311-333.
- LE ROY, Jean-Baptiste, *Mémoire sur le météore ou globe de feu*, MARS 1771 (1774), p. 668-694.
- LEHN, Waldemar H., VAN DER WERF, Siebren, *Atmospheric refraction : a history*, Applied Optics 44 (2005), p. 5624-5636.
- LINDEMANN, Frederick Alexander, DOBSON, Gordon Miller Bourne, *A Theory of Meteors, and the Density and Temperature of the Outer Atmosphere to which it Leads*, Proceedings of the Royal Society 102, 717 (1923), 411-437.
- LOGAN, James, *Some Thoughts concerning the Sun and Moon, when near the Horizon, appearing larger than when near the Zenith ; being Part of a Letter from James Logan*

- to Sir Hans Sloane, Bart. *President of the Royal Society*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 39 (1736), p. 404-405.
- LOGAN, James, *Sur la Grandeur du Soleil & de la Lune , dont le Diamètre paraît plus grand près de l'Horizon que près du Zénith, tirées d'une Lettre de M. Jacques Logan, Écuyer, à M. Hans Sloane , Chevalier Baronet, Président de la Société Royale, & c.*, Transactions de la Société Royale de Londres, Année M. DCC. XXXV., Paris, Piget, 1738, p. 404-405.
- LUDOLFF le jeune, C.F., *Mémoire sur l'électricité des baromètres*, Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres de Berlin, Année MDCCXLV, Berlin, Ambroise Haude, 1746, p. 3-7.
- MAC LAURIN, Colin, *Exposition des Découvertes philosophiques de M. le Chevalier Newton*, traduit de l'anglais par M. Lavirotte, Livre troisième, Paris, Durand et Pissot, 1749, p. 231-254.
- MAIRAN, Jean-Jacques Dortous de, *Dissertation sur la cause de la lumière des phosphores et des noctiluques*, Bordeaux, R. Brun, 1717.
- MAIRAN, Jean-Jacques Dortous de, *Traité physique et historique de L'aurore boréale* (1731), Paris Imprimerie Royale, 1733.
- MAIRAN, Jean-Jacques Dortous de, *Éclaircissements sur le traité physique et historique de l'aurore boréale*, MARS 1747 (1752), p. 363-435.
- MAIRAN, Jean-Jacques Dortous de, *Dissertation sur la Glace, ou Explication Physique de la formation de la Glace, & de ses divers phénomènes*, Paris, Imprimerie Royale, 1749.
- MAIRAN, Jean-Jacques Dortous de, *Chapitre II. Que le Baromètre ne nous indique point le véritable poids de l'Atmosphère, ni par conséquent sa hauteur ; Chapitre V. De l'Hypothèse des Glaces et des Neiges de la Zone Polaire, pour la formation de l'Aurore Boréale, & de l'opinion qui rapporte ce Phénomène à la matière Magnétique*, Traité physique et historique de l'aurore boréale, Seconde Édition, Paris, Imprimerie Royale, 1754, p. 45-53, 74-78.
- MALEBRANCHE, Nicolas, *Des Sens* (1678), Œuvres de Malebranche, Nouvelle Édition, Livre Premier, Chapitre IX, Paris, Charpentier, 1853, p. 63-73.
- MALEBRANCHE, Nicolas, *Réponse du P. Malebranche, prestre de l'oratoire, à M. Régis*, Paris, André Pralard, 1693.
- MALHERBE, Jean-Marie, *De la lunette de Galilée à Solar Dynamics Observatory : quatre cents ans d'observation du Soleil*, Observatoire de Paris, France, 2016, pp. 38.
- MARALDI, Jacques-Philippe, *Expériences du baromètre faites sur diverses montagnes de la France*, MARS 1703 (1720), p. 229-237.

- MARALDI, Jacques-Philippe, *Observations Du Baromètre & du Thermomètre faites en différentes Villes pendant l'année 1705*, MARS 1706 (1731), p. 12-13.
- MARALDI, Jacques-Philippe, *Observations d'une lumière septentrionale*, MARS 1716 (1718), p. 95-107.
- MARAT, Jean-Paul, *Découvertes de M. Marat, sur le Feu, l'Électricité et la Lumière, constatées par une suite d'expériences nouvelles, qui viennent d'être vérifiées par MM les Commissaires de l'Académie des Sciences*, Paris, Imprimerie de Clousier, 1779.
- MARAT, Jean-Paul, *Recherches physiques sur le feu*, Paris, Cl. Ant. Jombert, 1780.
- MARIOTTE, Edme, *Discours De la nature de l'air* (1676), Œuvres de M. Mariotte de l'Académie des Sciences, Nouvelle Édition, Tome Premier, La Haye, Jean Neaulme, 1740, p. 149-182.
- MARIOTTE, Edme, *Premier discours : De plusieurs propriétés des corps fluides*, Traité du Mouvement des Eaux et des Autres Corps Fluides (1686), Nouvelle édition corrigée, Paris, Jean Jombert, p. 1-17, 1700.
- MARTIN, Craig, *The invention of the atmosphere*, *Studies in History and Philosophy of Science* 52 (2015), p. 44-54.
- MARVIN, Ursula B., *Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) and the origins of modern meteorite research*, *Meteoritics and Planetary Sciences* 31 (1996), p. 545-588.
- MASKELYNE, Nevil, *A plan for observing the meteors called fire-balls*, *The Gentleman's Magazine and Historical Chronicle*, Volume LIII, London, J. Nichols, 1783, p. 991-992.
- MASSIGNAT, Corinne, *Gassendi et l'élasticité de l'air : Une étape entre Pascal et la loi de Boyle Mariotte*, *Revue d'histoire des sciences* 53, 2 (2000), p. 179-204.
- MAYRARGUE, Arnaud, *Air, lumière et matière réfractive*, *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie* 44, (2009), p. 47-60.
- MAYRARGUE, Arnaud, *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*, *Revue d'histoire des sciences* 63 (2010), p. 67-91.
- MERSENNE, Marin, *La vérité des sciences. Contre les Septiques ou Pyrrhoniens*, Paris, Toussaint du Bray, 1625, p. 930-933.
- MERSENNE, Marin, *Livre Cinquième. Des Instruments à Vent*, Seconde partie de l'Harmonie Universelle, Paris, Pierre Ballard, 1637, p. 225-226.
- MILL, John Stuart, *La Philosophie de Berkeley*, *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 1^{ère} année, Tome 1, wikisource, 1876, p. 125-160.
- MOLIERE, Joseph-Privat de, *Nouvelle explication du magnétisme*, *Leçons de physique*, Leçon XIV, Paris, Brocat, Musier, Bullot, 1737, p. 355-466.

- MOLYNEUX, William, *Concerning the apparent Magnitude of the Sun and Moon, or the apparent Distance of two Stars, when near the Horizon, and when higher elevated*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 16 (1687), p. 314-323.
- MUSSCHENBROEK, Pieter van, *Chapitre II. Du corps en général, & de ses propriétés, Chapitre XVIII. De la vertu attractive des corps, Chapitre XXXIII. De la Lumière qui traverse les Humeurs de l'Œil, et de la Vision, Chapitre XXXVI. de l'Air, Cf chap. XL. Des météores ignés*, Essai de Physique, Leiden, Samuel Luchtman, 1739, p. 22-62, 272-343, 567-588, 701-706, 813-847.
- NEWTON, Isaac, *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (1687), par feu le marquis du Chastellet, Paris, Desaint & Saillant, Lambert, 1759.
- NOLLET, Jean Antoine, *De l'air considéré comme atmosphère terrestre*, Leçons de physique expérimentale, Tome troisième, Paris, Frères Guérin, 1745, p. 335-362.
- NOLLET, Jean Antoine, *XIX Expérience*, Leçons de physique expérimentale (1743), Tome troisième, quatrième édition, Paris, Hippolyte-Louis Guérin, Louis-François Delatour, p. 314-331, 1759.
- NOLLET, Jean Antoine, *II. Leçons : De la Porosité, Compressibilité & Élasticité des Corps*, Leçons de physique expérimentale (1743), Tome premier, septième édition, Paris, Durand, Neveu, Libraire, p. 81-176, 1771.
- OLIVER, André, *Essai sur les comètes*, Amsterdam, Marc-Michel Ray, 1777.
- PEOUX, Gérald, *L'homme, l'air et les réfractions à la fin du XVIe siècle*, In: Bulletin de l'Association Guillaume Budé, n°2 (2010), p. 227-250.
- PERRAULT, Claude, *Du ressort et de la dureté des corps*, Essai de Physique, Paris, Jean-Baptiste Coignard, 1680.
- PETIT, *Extrait d'une Lettre de M. Petit Intend. des Fortific. &c. au R. P. de Billy de la Comp. de Jésus, Touchant une nouvelle machine pour mesurer exactement les Diamètres des Astres*, Le Journal des Sçavans De l'An M. DC. LXVII. (1667), Amsterdam, Pierre Le Grand, 1685, p. 130-143.
- PICARD, Jean-Félix, *Expérience faite à l'Observatoire sur le baromètre simple touchant un nouveau phénomène qu'on y a découvert*, Journal des Sçavans, Amsterdam, Pierre le Grand, 1675, p. 132.
- PINGRE, Alexandre Guy, *Cométographie ou Traité historique et théorique des Comètes*, Paris, Imprimerie Royale, 1783.
- PLANA, Jean, *Réflexions sur les objections soulevées par Arago contre la priorité de Galilée pour la double découverte des taches solaires noires, et de la rotation uniforme du globe*

- du Soleil*, Memorie Della Reale Accademia Delle scienze di Torino, Torino, Dalla Stamperia Realle, 1863, p. 151-187.
- PLANTADE, François de, *Sur deux Aurores Boréales observées en 1726 & 1730*, Histoire de la Société Royale des Sciences établie à Montpellier, avec les mémoires de mathématique et de physique, Tome Second, Montpellier, Jean Martel, 1778, p. 4-23.
- PLUG, Cornelis, ROSS, Helen E., *Historical Review*, In the Moon illusion, Hershenson, M., Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1989, p. 5-30.
- PORRETT, Robert, *Observations on the Flame of a Candle*, Annals of Philosophy, Vol. IX, London, Baldwin, Cradock and Joy, 1817, p. 337-341.
- PRIESTLEY, Joseph, *Histoire de l'électricité*, Tomes Premier et Second, Paris, Hérisant le fils, 1771.
- PRINGLE, John, *Some Remarks upon the Several Accounts of the fiery Meteor (which appeared on Sunday the 26th of November, 1758), and upon other such Bodies*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 51 (1759), p. 259-274.
- RAYNAUD, Dominique, *La perspective aérienne de Léonard de Vinci et ses origines dans l'optique d'Ibn al-Haytham (De aspectibus, III, 7)*, Arabic Sciences and Philosophy, Cambridge University Press (CUP), 2009, p. 225-246.
- REAUMUR, René-Antoine Ferchault de, *Expériences qui montrent avec quelle facilité le fer & l'acier s'aimantent, même sans toucher l'aimant*, MARS 1725 (1753), p. 81-105.
- REGIS, Pierre-Sylvain, *Des effets du poids de l'Air sur la surface des Liqueurs, De la nature, de l'origine et des propriétés de l'aimant, Comment on connaît la distance des objets par la vue*, Système de philosophie contenant la Logique, Métaphysique, Physique et Morale, Tome Troisième, Lyon, Anisson, Posuel & Rigaud, 1691.
- REGNAULT, Noël, *III. Entretien sur l'existence de la matière subtile, IV. Entretien sur la porosité des corps*, Les entretiens physiques d'Ariste et d'Eudoxe, ou Physique nouvelle en Dialogues, qui renferme précisément ce qui s'est découvert de plus curieux & de plus utile dans la Nature (1732), Tome premier, Paris, David l'ainé, Durand, p. 30-39, 39-52 1745.
- RICCIOLI, Ioanne-Baptista, *Almagestum novum*, 1651, p. 39.
- RICKER III, Harry Hamlin, *Magnetism during the seventeenth century*, The general science Journal, 2011.
- RICKER III, Harry Hamlin, *Magnetism in the eighteenth century*, The general science Journal, 2011.

- RICKER III, Harry Hamlin, *William Gilbert Founder of Terrestrial Magnetism*, The general science Journal, 2011.
- ROHAULT, Jacques, *Des mouvements que l'on a coutume d'attribuer à la crainte du vide, de l'aimant*, Traité de physique, Paris, Veuve de Charles Savreux, 1671, p. 70-99, 173-177, 198-236.
- ROHAULT, Jacques, *Chapitre XXXII. Comment se fait la vision*, Traité de physique, Tome premier, Quatrième édition, Lyon, Veuve de Jean-Bapt. Guillimin, 1696, p. 371-386.
- ROUGIER, Louis, *De Torricelli à Pascal* (1927), Introduction de Simone Mazaucic, Philosophia Scientiæ (2010).
- RYCK, *Expérience faite à Leiden et envoyée par Monsieur Ryck Professeur de cette ville à Monsieur Instel le 9. Mars 1679*, Journal des Sçavans pour l'année M. DC. LXXIX., Paris, Jean Cusson, 1679, p. 107-108.
- SAURIN, Joseph, *Solution de la principale difficulté proposée par M. Hugens contre le système de M. Descartes, sur la cause de la Pesanteur*, Journal des Sçavans, Paris, Jean Cusson, 1703, p. 24-30.
- SAURIN, Joseph, *Examen d'une difficulté considérable proposée par M. Hugens contre le système cartésien sur la cause de la Pesanteur*, MARS 1709 (1733), p. 131-148.
- SEARS, Paul M., *Notes on the Beginnings of Modern Meteoritics*, Meteoritics 2, 4 (1965), p. 293-299.
- SIMPSON, Thomas, *Mathematical dissertations on a variety of physical and analytical subjects*, London, T. Woodward, 1743, p. 46-61.
- SLIMANEK, Donald E., *The Moon Illusion, An Unsolved Mystery*, Article sous forme électronique sur le lien : <https://www.lockhaven.edu/~dsimanek/3d/moonillu.htm>.
- SMITH, Robert, *Chapitre V, Concerning our Ideas acquired by Sight*, A compleat system of Opticks, Cambridge, Cornelius Crownfield, 1738, p. 61-65.
- SORBIERE, Samuel de, *Lettre n° LXIX. Continuation des Remarques, Des Atmosphère & Émanations, causes du mouvement des Planètes*, Lettres et discours sur diverses matières curieuses, Paris, François Clouzier, 1660, p. 495-517.
- SWINDEN, Jan Hendrik van, *Dissertation sur les mouvements irréguliers de l'aiguille aimantée*, Analogie de l'électricité et du magnétisme ou Recueil de Mémoires, Tome III, La Haye, Veuve Duchesne à Paris, 1785.
- TAUSSIG, Sylvie, *Vrai et faux soleil(s) chez Gassendi*, Revue d'histoire des sciences 69 (2016), p. 245-258.
- VARIGNON, Pierre, *Nouvelles Conjectures sur la Pesanteur*, Paris, Jean Boudot 1690.

- VOLTAIRE, *Éléments de la philosophie de Newton, donnés par M^r de Voltaire*, Londres, Nouvelle Edition, 1738, p. 49-71.
- WAGNER, Mark, BAIRD, John C., FULD, Kenneths, *Transformation model of the Moon illusion*, In the Moon illusion, Hershenson, M., Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1989, p. 148-167.
- WALLIS, John, *An Extract of Letters from Dr John Wallis to the Publisher, 1672. Sept. 26, &c. Concerning the Suspension of Quicksilver well purged of Air, much higher than the ordinary Standard in the Torricellian Experiment*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 7, 91 (1672), p. 5160-5170.
- WALLIS, John, *Extract of three Letters of Dr. Wallis, concerning an unusual Meteor seen at the same time in many distant places of England*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 12, 135 (1677), p. 863-866.
- WALLIS, John, *Extrait d'une lettre du Docteur Wallis du 26 septembre 1672, sur la suspension du mercure purgé d'air, à une hauteur plus considérable que dans l'expérience de Torricelli*, Collection Académique, Tome II, Dijon, François Desventes, Auxerre, François Fournier, 1755, p. 374-380.
- WALLIS, John, *The Sentiments of Dr. John Wallis, R. S. Soc. on the aforesaid Appearance. Communicated in a Letter to the Editor*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 16, 187 (1687), p. 323-329.