



HAL
open science

Systemes de la réfraction atmosphérique à l'aube du XVIIIe siècle : le contexte cartésien de l'invention de la matière réfractive

Eric Chassefière

► **To cite this version:**

Eric Chassefière. Systemes de la réfraction atmosphérique à l'aube du XVIIIe siècle : le contexte cartésien de l'invention de la matière réfractive. Cahiers François Viète, 2022, Les mathématiques professionnelles (XVIe-XIXe siècle), III-13, pp.225-252. hal-03808452

HAL Id: hal-03808452

<https://cnrs.hal.science/hal-03808452>

Submitted on 10 Oct 2022

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.



Page d'information
pour le suivi de votre article

Cahiers François Viète

Numéro de l'article : (ultérieurement attribué par le comité de rédaction)

Auteur 1

Nom et prénom : Chassefière Eric

Laboratoire et université de rattachement : SYRTE, Observatoire de Paris-Université PSL

Fonction actuelle : Directeur de Recherche au CNRS

Email : eric.chassefiere@obspm.fr

Adresse postale (pour envoi du volume après publication) : SYRTE, Observatoire de Paris-Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Titre en français de votre article : Systèmes de la réfraction atmosphérique à l'aube du XVIII^e siècle : le contexte cartésien de l'invention de la matière réfractive

Titre en anglais de votre article : Systems of atmospheric refraction at the dawn of the 18th century: the Cartesian context of the invention of refractive matter

Résumé en français de votre article (maximum 800 caractères espaces compris): Nous analysons dans cet article les héritages des deux grands systèmes de la réfraction atmosphérique en cours à l'aube du XVIII^e siècle, l'un prédominant dans la pensée française faisant opérer la réfraction aux frontières air-vapeurs ou vapeurs-vapeurs, basé sur le principe d'une stratification de la subtilité, l'autre prédominant dans la pensée anglaise la faisant agir aux frontières éther-air ou air-air, basé sur le principe d'une stratification de la pesanteur (c'est-à-dire de la densité). Nous montrons comment les savants se sont appropriés et ont fait évoluer les idées dans leurs propres systèmes de pensée, cartésien à l'Académie Royale des Sciences, newtonien à la Royal Society, et expliquons la naissance de concept de matière subtile réfractive dans la communauté française par le souci d'affirmer la spécificité cartésienne française.

Résumé en anglais de votre article (maximum 800 caractères espaces compris): In this paper we analyse the legacies of the two great systems of atmospheric refraction in use at the dawn of the eighteenth century, one predominating in French thought making refraction operate at the air-vapour or vapour-vapour boundaries, based on the principle of a stratification of subtlety, the other predominating in English thought making it operate at the ether-air or air-air boundaries, based on the principle of a stratification of gravity (i.e. density). We show how scholars appropriated and evolved the ideas in their own systems of thought, Cartesian in the Royal Academy of Sciences, Newtonian in the Royal Society, and explain the birth of the concept of subtle refractive matter in the French community by the concern to assert French Cartesian specificity.

Liste de 5 à 10 mots-clés en français pour indexation : Réfraction atmosphérique, vapeurs, air, matière réfractive, Rothmann, Tycho Brahe, Picard, Hartsoeker, Cassini, Hooke, Newton.

Liste de 5 à 10 mots-clés en anglais pour indexation : Atmospheric refraction, vapours, air, refractive matter, Rothmann, Tycho Brahe, Picard, Hartsoeker, Cassini, Hooke, Newton.

En cochant cette case, vous attestez avoir pris connaissance de la charte de publication et d'évaluation, et d'en accepter les termes.

 Charte téléchargeable sur
<https://cfv.univ-nantes.fr/cahiers-francois-viete/soumission>

Systemes de la réfraction atmosphérique à l'aube du XVIII^e siècle : le contexte cartésien de l'invention de la matière réfractive

Résumé

Nous analysons dans cet article les héritages des deux grands systèmes de la réfraction atmosphérique en cours à l'aube du XVIII^e siècle, l'un prédominant dans la pensée française faisant opérer la réfraction aux frontières air-vapeurs ou vapeurs-vapeurs, basé sur le principe d'une stratification de la subtilité, l'autre prédominant dans la pensée anglaise la faisant agir aux frontières éther-air ou air-air, basé sur le principe d'une stratification de la pesanteur (c'est-à-dire de la densité). Nous montrons comment les savants se sont appropriés et ont fait évoluer les idées dans leurs propres systèmes de pensée, cartésien à l'Académie Royale des Sciences, newtonien à la Royal Society, et expliquons la naissance de concept de matière subtile réfractive dans la communauté française par le souci d'affirmer la spécificité cartésienne française.

Mots-clés : Réfraction atmosphérique, vapeurs, air, matière réfractive, Rothmann, Tycho Brahe, Picard, Hartsoeker, Cassini, Hooke, Newton.

Abstract

In this paper we analyse the legacies of the two great systems of atmospheric refraction in use at the dawn of the eighteenth century, one predominating in French thought making refraction operate at the air-vapour or vapour-vapour boundaries, based on the principle of a stratification of subtlety, the other predominating in English thought making it operate at the ether-air or air-air boundaries, based on the principle of a stratification of gravity (i.e. density). We show how scholars appropriated and evolved the ideas in their own systems of thought, Cartesian in the Royal Academy of Sciences, Newtonian in the Royal Society, and explain the birth of the concept of subtle refractive matter in the French community by the concern to assert French Cartesian specificity.

Keywords: Atmospheric refraction, vapours, air, refractive matter, Rothmann, Tycho Brahe, Picard, Hartsoeker, Cassini, Hooke, Newton.

Introduction

Après nous être intéressés à la notion d'air - air grossier, pur ou subtil - au XVIII^e siècle, et ce que la conception de l'atmosphère alors prédominante, s'appuyant sur les mesures de barométrie réalisées sur les montagnes et l'observation des aurores boréales, implique quant à son extension verticale vers le haut (Chassefière 2021a), nous nous focalisons dans la présente étude sur la partie inférieure de l'atmosphère, pour l'essentiel responsable de la réfraction atmosphérique, et l'hypothèse avancée par des savants de l'époque d'une couche de matière réfractive subtile distincte de l'air atmosphérique présente au voisinage de la surface terrestre. Nous suggérons, comme dans notre première étude, mais suivant des modalités différentes, une forte empreinte de la doctrine cartésienne d'un univers tourbillonnaire peuplé de matière subtile sur le déroulement de la pensée en la matière.

L'introduction du concept de matière réfractive au début du XVIII^e siècle s'inscrit dans l'époque bien particulière de l'émergence progressive du newtonianisme sur le continent. C'est plus précisément dans les vingt premières années du siècle, dans une période où les résultats des expériences de réfraction de John Lowthorp à la *Royal Society* montrant le lien direct entre le pouvoir réfractif de l'air et sa densité (Lowthorp, 1700) ne sont pas encore pleinement admis à l'Académie Royale des Sciences, que s'affirme, nous allons le voir, l'idée d'une matière subtile réfractive distincte de l'air. Cette période est précisément celle de la découverte progressive du newtonianisme en France, s'accompagnant d'une hostilité croissante de la majorité cartésienne de l'Académie des Sciences à l'encontre de la théorie newtonienne (Crépel et Schmit, 2017, p. 24-39). La nature exacte et l'intensité de cette hostilité ont fait l'objet de nombreux travaux. Pour les uns, les cartésiens se réforment partiellement en reconnaissant la valeur des travaux de Newton sans pour autant reconnaître le vide et l'attraction à distance (voir par ex. Guerlac, 1981), pour les autres ils demeurent campés sur la doctrine cartésienne sans rien concéder au newtonianisme (voir par ex. Borghero, 2011), tout le monde reconnaissant une intensification des tensions après 1720. La publication de l'Optique de Newton, en

1706, a peut-être constitué le premier catalyseur de l'amorce de tension qui se manifeste au début de la décennie suivante en France entre newtoniens et cartésiens, l'opposition entre les deux camps se raidissant vers 1715 (Shank, 2008). Ce contexte d'opposition constitue la toile de fond des idées présentées dans cet article. Le sujet principal n'en est pas la matière réfractive par elle-même, déjà étudiée en détail (Mayrague, 2009), mais le terrain conceptuel sur lequel en a émergé l'idée, s'inscrivant à plusieurs titres dans la pensée cartésienne alors dominante à l'Académie des Sciences.

L'histoire des conceptions de la réfraction atmosphérique est marquée par le phénomène dit aujourd'hui de « l'illusion lunaire », qui suscite très tôt l'engouement dans les communautés savantes (voir par ex. Plug & Ross, 1989) et dont il ne semble pas douteux qu'il ait contribué à entretenir l'idée, chez certains savants, d'un rôle majeur des particules en suspension dans la réfraction atmosphérique. Le fait que la Lune paraisse plus grosse quand elle est vue près de l'horizon constitue le fait observationnel originel sur lequel est bâtie une bonne partie de la science développée sur la réfraction jusqu'au XVIII^e siècle. Cléomède, au premier siècle avant notre ère, 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 bâton placé dans l'eau (Lehn & Van der Werf, 2005, p. 5625-5627). La réfraction se produit sur la surface, 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. Cléomède ne mentionne pas la réfraction qui se produit en amont, à l'interface entre l'air humide et l'éther, et on peut douter du fait qu'il la considère. Un tel oubli serait cohérent avec l'idée d'un grossissement par la réfraction, puisqu'il revient à supposer l'objet physique Lune directement immergé dans l'air humide, tout comme le bâton l'est dans l'eau. Cléomède suppose implicitement que le degré de réfringence de l'air humide, chargé de gouttelettes d'eau, est équivalent à celui de l'eau liquide (*Ibid.*)¹. On utilisera dans la suite, conformément à la dénomination de l'époque, le terme de « vapeurs »² pour désigner les particules en suspension dans l'atmosphère supposées être à l'origine de la réfraction.

Malgré l'introduction précoce d'une explication de nature psychologique par Cléomède, reprise notamment par Ptolémée (Plug & Ross, 1989, p. 7), l'hypothèse réfractive demeure prégnante durant tout le Moyen-Âge, comme en attestent par exemple au XIII^e siècle les travaux du moine polonais Vitellion, qui reprend et affine le modèle de réfraction de Ptolémée (Lehn & Van der Werf, 2005, p. 5631). Au tournant du XVII^e siècle, Johannes Kepler admet l'interprétation psychologique et, bien que reconnaissant l'importance des travaux de Vitellion, rejette l'idée de vapeurs s'élevant à l'horizon qui agrandiraient l'image de la Lune car pourquoi, demande-t-il, ces vapeurs seraient-elles toujours présentes au-dessus de l'horizon de l'observateur, et jamais au-dessus du lieu d'où il fait son observation (*Ibid.*, p. 5627)? Kepler est le premier à déduire la nécessité de l'aplatissement du disque solaire sur l'horizon du fait que la réfraction doit relever davantage le bord inférieur du Soleil, plus proche de l'horizon, que son bord supérieur (Kepler, 1604³). Dès 1667 à l'aide du micromètre inventé par Auzout cette année-là (Auzout, 1667, p. 2-4), on met en évidence que la Lune, en cohérence avec le fait qu'à l'horizon elle est plus éloignée de l'observateur d'un demi-diamètre terrestre qu'elle ne l'est au zénith, y apparaît légèrement plus petite (d'un soixantième, cf Petit, 1667, p. 130-143). Ainsi, au lieu d'être agrandie sur l'horizon, la Lune s'y trouve diminuée. L'hypothèse psychologique fait son chemin au XVII^e siècle, mais néanmoins, en 1691, Pierre-Sylvain Régis continue d'affirmer avec force, et en dépit des résultats de l'observation qui, depuis Kepler, puis Auzout, prouvent le contraire, la réalité de l'hypothèse réfractive, arguments à l'appui (Régis, 1691, p. 241-246). Une controverse

¹ Cléomède invoque cependant, dès cette époque, une deuxième raison de nature psychologique au phénomène, à savoir ce qui est appelé aujourd'hui le principe d'invariance taille-distance, qui dit que si nous percevons un objet plus éloigné, à diamètre angulaire donné, nous le percevons aussi plus grand.

² Les vapeurs sont définies au XVII^e siècle comme les « parties subtiles d'un corps humide, qui forment une espèce de fumée qu'une chaleur médiocre élève, et ne peut dissiper. Les nuages, les brouillards se forment des vapeurs qui s'élèvent de la Terre » (Furetière, Article « vapeurs », 1690), et désignent donc les particules, liquides ou solides, qui se forment à la surface ou dans l'atmosphère à partir des émanations terrestres. On désignera donc dans cet article par le terme de « vapeurs » ce que l'on devrait plus proprement nommer « vapeurs condensées », terme d'ailleurs employé par certains auteurs cités dans cet article, comme Nicolas Hartsoeker.

³ On peut aussi consulter à ce sujet : Arago, 1855, p. 217-223.

acérbe l'oppose à la toute fin du XVII^e siècle à Nicolas Malebranche sur ce sujet (Malebranche, 1693, p. 10), une occasion que, comme nous allons le voir, Nicolas Hartsoeker va saisir pour reformuler un système réaliste de la réfraction atmosphérique dans le cadre conceptuel cartésien.

Deux grands systèmes de la réfraction vont se développer durant la seconde moitié du XVII^e siècle, celui de Jean Picard directement inspiré du système tychonien d'une réfraction provoquée par les vapeurs qui chargent l'atmosphère, celui de Robert Hooke, qui suppose la réfraction contrôlée par la densité de l'air et non par son contenu en vapeur, en cohérence, nous y reviendrons, avec la conception de Kepler. Nous décrivons d'abord chacun de ces deux systèmes en retraçant l'histoire des pensées qui leur ont donné naissance, et en montrant comment les savants du XVIII^e siècle naissant s'en sont emparés et les ont fait évoluer au sein de leurs propres systèmes de pensée, cartésien à l'Académie Royale des Sciences, newtonien à la *Royal Society*. Nous montrons ensuite comment les contradictions rencontrées par les astronomes de l'académie parisienne les ont amenés, pour garder la cohérence sans se renier, à postuler l'existence d'une matière subtile réfractive, concept qui survivra tout au long du XVIII^e siècle, alors même que les physiciens anglais étaient parvenus dès la fin du XVII^e siècle à une vision cohérente de la réfraction, ne nécessitant aucune remise en question majeure du cadre conceptuel. Nous suggérons que le choix français est dicté par l'affirmation d'une spécificité française cartésienne dans le contexte particulier de pénétration du newtonianisme décrit au début de cette introduction.

Vapeurs condensées et réfraction à la frontière air-vapeurs ou vapeurs-vapeurs : de Tycho à Picard, puis Hartsoeker

L'idée que les vapeurs jouent le rôle majeur dans la réfraction de la lumière des astres a été soutenue par Christoph Rothmann à la fin du XVI^e siècle (Péoux, 2010). Ce dernier, s'inscrivant dans la doctrine stoïcienne reprise quelques décennies plus tôt par Jean Pena (Barker, 1985), suivant laquelle la substance de l'éther ne diffère pas en nature de la matière terrestre, pense 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. Pena s'était appuyé pour légitimer cette affirmation sur les observations du physicien hollandais Gemma Frisius, suivant lequel la réfraction de la lumière ne perturberait pas la position apparente des étoiles dans le ciel nocturne, ce qui impliquait selon lui l'absence de frontière entre milieux de densité différente sur le trajet suivi par les rayons lumineux. Or, Tycho Brahe a mis précisément en évidence un déplacement apparent des étoiles, infirmant les résultats obtenus par Frisius cinquante ans auparavant, et montrant que la lumière est réfractée en un ou plusieurs endroits sur son trajet. Les échanges dans la correspondance entre Rothmann et Tycho Brahe dans la décennie 1580 sont vifs, le second concédant la possibilité d'une transition continue entre air grossier d'en bas et air pur d'en haut, sans pour autant admettre la nature aérienne de la matière emplissant l'espace interplanétaire dont il considère qu'il s'agit de l'éther. Rothmann résout la contradiction entre l'existence d'effets observés de la réfraction et sa conception d'un ciel continu sans dichotomie air-éther en invoquant le rôle des vapeurs « qui sont toujours présentes près de l'horizon » (Péoux, 2010, p. 241). Cette hypothèse revient à remplacer la limite éther-air par une limite air-vapeurs, le taux de chargement en vapeurs de l'air se substituant à la densité de l'air comme déterminant de l'amplitude de la réfraction. Cette idée d'un rôle majeur des particules dans la réfraction atmosphérique est en cohérence avec l'explication du phénomène de grossissement apparent de la Lune sur l'horizon, dont on a dit qu'elle imprègne les esprits depuis l'antiquité, et cela ne peut que favoriser sa diffusion dans la sphère savante de l'époque.

Nous utilisons dans la suite, concernant la théorie de la réfraction atmosphérique de Tycho Brahe, les informations fournies par Jean-Baptiste Joseph Delambre dans son *Histoire de l'astronomie moderne* (Delambre, 1821, Tome premier, Livre III, p. 148-261), une source détaillée et pertinente s'agissant de la façon dont se forge la pensée de Tycho dans la confrontation aux idées de Rothmann (Péoux, 2010, p. 245). Tycho, écrit Delambre, « entreprend de prouver que les réfractions ne viennent pas de la différente densité des milieux que traverse la lumière ; *car les réfractions ne devraient cesser qu'au zénit, ce qui n'est pas conforme à l'expérience* » (Delambre, 1821, Tome premier, p. 157). Tycho ne mesure en effet pas de déplacement sensible du Soleil à partir de 45° de hauteur au-dessus

de l'horizon (Tycho Brahe, 1610, p. 79), et pour cette raison estime que la réfraction qui se produit à la frontière entre l'éther et l'air ne peut être que très faible, sans quoi la réfraction s'observerait bien au-dessus de 45°. Par ailleurs, il trouve que la réfraction des étoiles diffère de la réfraction solaire et n'est plus mesurable au-dessus de 20° (Delambre, 1821, Tome premier, p. 185). « Le changement rapide des réfractions, dans les premiers degrés de hauteur, ajoute à la conviction où il est que les réfractions sont produites par les vapeurs, et c'est ce qui accélère le lever du Soleil et retarde son coucher », indique Delambre (*Ibid.*, p. 158). La conception développée par Tycho est inspirée de celle de Rothmann, avec qui il a échangé une correspondance suivie entre 1586 et 1590. La différence majeure est que Tycho admet l'existence d'une réfraction, certes très « mince » (Péoux, 2010, p. 243), à la frontière éther-air, que Rothmann nie au nom de son rejet de l'éther. Tycho, ayant cherché à se rapprocher des positions de son interlocuteur, a évoqué « la continuité des diaphanes de l'air et de l'éther qui se mélangeraient progressivement » vers le haut, affirmant que l'air contigu « aux révolutions de la lune ne diffère que très peu de l'éther » (*Ibid.*). Ainsi la réfraction atmosphérique est-elle contrôlée, selon Rothmann par la variation verticale du chargement en vapeurs de l'air, selon Tycho par la proportion d'éther dans le mélange éther-air (l'air terrestre donc « grossier », incluant les vapeurs). Les conceptions des deux savants se rejoignent sur l'idée fondamentale que c'est une stratification de l'air en « subtilité » qui est responsable de la réfraction, au point que Tycho dans son *Astronomiæ Instauratæ Progymnasmata* traite physiquement la réfraction comme l'aurait fait Rothmann. Chez Tycho se superpose à la stratification en subtilité une stratification en « pesanteur », au sens de poids spécifique (densité), puisque l'idée même d'un mélange avec un éther de faible poids spécifique (comme l'imagine Tycho) implique une décroissance de la densité avec l'altitude. On retrouve cette double stratification de l'atmosphère en subtilité et pesanteur, par exemple, dans les travaux de Jean Rey, un chimiste qui a mis en évidence avant Torricelli le poids de l'air par des expériences de calcination de l'étain et du plomb, qui écrit en 1630 :

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. (Rougier, 1927, dans Mazauric, 2010, p. 70)

Un élément intéressant rapporté par Delambre concerne la mise en évidence par Rothmann d'une « différence de 1' ou 2' sur la hauteur du pôle en été et en hiver » (Delambre, 1821, tome premier, p. 204) attribuable à la réfraction, celui-ci ayant donc précédé de presque un siècle Jean Picard qui note dans ses observations faites entre 1672 et 1674 :

Car étant en Été, au haut du Mont-Valerien, un matin avant que le Soleil se levât, & m'étant avisé de pointer un quart de cercle vers le sommet des Tours de N. Dame de Paris, je les trouvai basses de 20'. Mais le Soleil ne fut pas plutôt levé, qu'elles parurent basses de 22', & je n'eus pas beaucoup de peine à concevoir, qu'avant le lever du Soleil, Paris avoit été dans un air beaucoup plus grossier que celui où j'étois, mais qu'ensuite, par l'action du Soleil, les vapeurs s'étant élevées, le milieu entre Paris & moi étoit devenu plus égal. (Picard, 1729, p. 339)

La variation saisonnière de la réfraction semble connue dès le début du XVII^e siècle, comme en attestent par exemple les mots suivants de Marin Mersenne en 1634 : « les refractions sont partout moindres en Automne, qu'en Hyver, & en autres saisons de l'année, & suivent la densité & la rareté de l'air des différents lieux où l'on se rencontre » (Mersenne, 1634, p. 57). Il faut prendre ici « densité » et « rareté » aux sens d'« opacité » et de « transparence », ainsi que le fait à la même époque Pierre Gassendi, qui écrit tout en notant le caractère peu précis de son affirmation : « chaque chose est d'autant plus transparente, qu'elle est plus rare, d'autant plus opaque, qu'elle est plus dense » (Bernier, 1684, p. 11). La densité désigne ici clairement l'opacité de l'air chargé de vapeurs, et non pas sa densité au sens de poids spécifique. Mersenne écrit d'ailleurs : « ces refractions arrivent quand l'air est épaissi par une vapeur qui monte de la terre, de sorte que la condensation de l'air fait une plus grande refraction du rayon » (Mersenne, 1634, p. 55-56). On comprend que la dépendance de la réfraction vis-à-vis du chargement en vapeurs de l'atmosphère, celui-ci étant supposé varier suivant

l'heure du jour ou l'époque de l'année du fait des fluctuations de température (une température élevée favorise le relâchement des vapeurs, une température basse leur piègeage dans le sol), offre une explication naturelle à la variation temporelle de la réfraction. Ainsi, l'idée d'un rôle majeur des vapeurs dans la réfraction est-elle corroborée par l'existence de variations diurnes et saisonnières de cette réfraction.

Il est significatif que la conception de la réfraction atmosphérique de Tycho soit très précisément celle exprimée par Jean Picard, qui écrit en 1671 dans sa *Mesure de la Terre* :

Il faut considérer que la Terre est enveloppée d'une Atmosphère ou air vaporeux, composé de regions différentes, qui sont plus subtiles à mesure qu'elles s'éloignent de la Terre : de manière que ce changement ne se faisant pas tout d'un coup, mais par degrez, le rayon visuel qui vient d'un lieu plus élevé à un plus bas, comme de D en I, & qui passe obliquement d'un air plus subtil à un plus grossier, est continuellement rompu en chemin, à mesure qu'il change de milieu; ce qui lui donne la position d'une ligne courbe. (*Ibid.*, p. 184)

On ne peut douter que Picard, observateur de génie, successeur en 1655 de Pierre Gassendi à la chaire d'Astronomie du Collège Royal, l'un des premiers membres de l'Académie Royale des Sciences à sa création en 1666, chargé par elle en 1669-1670 de la mesure de l'arc de méridien entre Paris et Amiens (Picard, 1671), initiateur de la venue en France de Jean-Dominique Cassini, envoyé en 1671 à Uraniborg exploiter les tables astronomiques de Tycho Brahe à des fins géodésiques (Picard, 1680), ait eu une influence considérable sur les astronomes qui lui ont succédé à l'Académie et à l'Observatoire. En particulier, Picard écrit qu'il avait rapporté d'Uraniborg les originaux des observations de Tycho, ce qu'il considérait « comme un des principaux fruits de [son] voyage » (*Ibid.*, p. 4-5)⁴. On note que Christian Huygens, également membre éminent de l'Académie parisienne dont il assure la direction scientifique à sa création, fournit dans son *Traité de la lumière* publié aux Pays-Bas en 1690, mais écrit en 1678 à Paris, une description ondulatoire de la réfraction, suivant laquelle la lumière se propage moins vite dans les couches basses de l'atmosphère qu'au-dessus, soit, dit-il, « que les particules de l'eau & celles de l'air participent, par le moyen des particules de la matiere etherée, du mouvement qui fait la lumiere, mais qu'elles soient d'un ressort moins prompt que celles-cy ; ou que la rencontre, & l'embarras que ces parties d'air & d'eau donnent à la propagation du mouvement des particules etherées, en retarde le progrez » (Huygens, 1690, p. 43). La première alternative, qui fait intervenir le ressort des particules de vapeurs condensées supposées participer à la propagation de la lumière, s'inscrit dans l'hypothèse que la cause de la réfraction tient à la plus ou moins grande subtilité du milieu, s'accordant avec la conception tychonienne. La seconde, suivant laquelle c'est le milieu, air et vapeurs confondues, qui entrave le mouvement de la matière subtile dans laquelle la lumière se propage, donne de fait à la densité du milieu le rôle prépondérant, alternative sur laquelle nous reviendrons dans la partie suivante.

Il faut remarquer que la vision de Tycho Brahe est en cohérence, tout au moins qualitativement, avec deux découvertes postérieures. La première, absolument fondamentale, est la mise en évidence par Evangelista Torricelli en 1644 du caractère pesant de l'atmosphère (voir par ex. Mazaucic, 2010). L'expérience du Puy-de-Dôme, réalisée peu après par Florin Périer, à la suggestion de Blaise Pascal et René Descartes, a montré que le poids de la colonne d'atmosphère diminue avec l'altitude, et confirmé la proposition de Torricelli. En Angleterre, Robert Boyle a établi la loi qui dit que la dilatation de l'air varie en raison inverse du poids de la colonne d'air qui le comprime (loi dite de Boyle-Mariotte). Ainsi, la densité de l'air décroît bien avec l'altitude, non qu'elle résulte d'un mélange air-éther dans lequel la proportion de l'éther léger irait croissante avec l'altitude, comme le suggérait Tycho, mais parce que l'air élémentaire est élastique et se dilate d'autant plus qu'il est moins pressé. Ainsi, bien que pour des raisons inexactes, Tycho avait-il raison « en supposant à l'air une diminution successive de densité jusqu'à ne plus différer de l'éther », ce que Kepler avait considéré comme une erreur

⁴ Ces originaux semblent en fait avoir été des copies réalisées au Danemark par Erasmé Bartholin pour Picard à partir des originaux de Tycho (Bigourdan, 1895, p. F6), mais cette copie rapportée par Picard d'Uraniborg aurait été rendue au Danemark « depuis plus de 150 ans » selon Bigourdan, soit depuis le milieu du XVIII^e siècle (*Ibid.*, p. F24).

(Delambre, 1821, tome premier, p. 363), à une époque où les caractéristiques physiques de l'air étaient encore inconnues. La deuxième découverte, faite au tout début du XVIII^e siècle par Jacques Cassini, est que l'air des montagnes semble plus élastique et donc plus pur que celui des plaines. Cassini publie en effet dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de 1705 une table de la variation de la pression entre le niveau de la mer et une altitude de 3000 m, dérivée de ses mesures barométriques pour des lieux situés entre 0 et 2000 m, comparée à celle proposée par Mariotte, qu'il commente ainsi : « Toutes les observations que je viens de rapporter concourent à donner, à mesure qu'on s'éloigne de la terre, une dilatation plus grande que celle qui résulte des principes de M. Mariotte » (J. Cassini, 1706, p. 70). Ainsi, l'élasticité de l'air en altitude semble croître plus vite que ne le prévoit la loi de Boyle-Mariotte, phénomène interprété par Cassini et d'autres (voir par exemple Chassefière, 2021a, p. 421-426) comme résultant d'une diminution avec la hauteur de la fraction des vapeurs et exhalaisons contenues dans l'air, s'inscrivant bien dans le paradigme proposé par Tycho Brahe. Une atmosphère vers le haut toujours moins dense, et toujours plus pure, voilà ce que l'observation et l'expérimentation viennent a posteriori confirmer.

En 1694, Nicolas Hartsoeker, dont Fontenelle dit dans l'Éloge du savant qu'il rédige à sa mort en 1725, qu'il « devint Cartésien à outrance, mais [il] s'en corrigea par la suite » (Fontenelle, 1727, p. 139), publie son *Essai de Dioptrique*. Il y présente un système du monde consistant en deux éléments : un premier élément constitué d'une « substance infiniment étendue, par tout semblable à elle même, liquide & flexible, sans qu'elle puisse se briser ou séparer », un deuxième élément constitué d'un « nombre infini de petits corps differens en figure, en grandeur & en mouvement », « d'une dureté si parfaite, qu'ils ne peuvent être ni brisez, ni ecornez, ni changez en aucune maniere », « de vrais atomes, impenetrables & indivisibles de leur nature, quoique divisibles à l'infini par la pensée » (Hartsoeker, 1694, p. 2-4). Le Soleil et les étoiles sont des amas du premier élément, et la lumière consiste en « petits ruisseaux de ce premier élément » sortant de ces amas. L'univers de Hartsoeker est tourbillonnaire à l'image de celui de Descartes, la différence résidant dans l'insécabilité physique des parties du deuxième élément. Hartsoeker sera nommé quelques années plus tard membre étranger de l'Académie Royale des Sciences (à sa refondation en 1699), gagnant l'amitié de Jean-Dominique Cassini pour qui il réalise des verres de télescope (Fontenelle, 1727, p. 142), et obtenant ainsi ses entrées à l'Observatoire de Paris. Il ne fait aucun doute que son essai, remarqué par Fontenelle, est à l'origine de sa nomination à l'Académie. Il y explique avoir décidé de traiter la question spécifique de la réfraction atmosphérique car « la dispute nouvelle de deux philosophes de grande reputation [Malebranche et Régis], dont l'un prétend que cette refraction est la veritable cause de la grandeur apparente de la lune dans l'horison [Régis], semble m'obliger à en dire un mot en passant, & à examiner si elle en peut être la veritable cause » (Hartsoeker, 1694, p. 53). Profitant de cette polémique pour déplacer la problématique de l'effet réfractif des vapeurs sur un terrain plus favorable, conservant aux particules un rôle crucial dans la réfraction, il fournit sa propre explication, en tous points semblable à celle de Tycho Brahe, ou de Picard :

il est évident qu'un rayon de lumiere, passant d'un air subtil dans un air moins subtil, & de cet air moins subtil dans un autre encore moins subtil, & ainsi de suite jusqu'à ce qu'il soit parvenu jusqu'à la surface de la terre, souffrira une infinité de tres-petites refractions insensibles, & décrira ainsi une ligne courbe, dont la tangente qui entrera dans l'oeil, nous donnera la quantité sensible de toutes les refractions insensibles, & nous fera voir le lieu apparent d'un objet, puisque les objets ne se voyent qu'en ligne droite. (*Ibid.*)

Mais tandis que ces astronomes, purs observateurs, n'avançaient pas de raison physique au rôle majeur qu'ils attribuaient aux vapeurs, Hartsoeker propose une hypothèse dans le cadre de son système du monde. Selon lui, les corps opaques sont tels que les rayons de lumière n'ont « pas assez de force pour séparer & pour ranger tellement leurs parties qu'ils puissent librement passer au travers », au contraire des corps transparents. La matière subtile qui est entre les particules des corps est supposée d'autant plus subtile que ces corps sont grossiers. Ainsi, « la matière qui est entre les particules de l'air a été supposée estre plus grossière que celle qui est dans les petits corps du verre, elle doit contraindre ce rayon avec plus de force, & le pousser vers la perpendiculaire » (au passage de l'air au verre). Les rayons de lumière passent plus librement à travers un milieu dur et structuré qu'à travers une substance

molle et désorganisée, comme l'avait théorisé Descartes dans sa Dioptrique en 1638 (Descartes, 1824, p. 27-28)⁵. Hartsoeker donne notamment l'argument que le passage de l'air au verre se fait de façon quasiment analogue à celui du vide pneumatique (celui qu'on obtient dans les machines pneumatiques, encore appelées machines du vide) au verre, pour attribuer aux particules solides en suspension dans l'atmosphère (« condensation » des vapeurs et exhalaisons) le rôle déterminant dans la réfraction atmosphérique. Comme d'autres avant lui, il explique la variation diurne et saisonnière de 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 et les vapeurs qui les causent ne montent guère haut en hiver, mais qu'elles demeurent condensées et en quantité vers la surface de la Terre ; et elles doivent pour les mêmes raisons être plus grandes vers les pôles, que vers les tropiques et 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, et où elles sont presque deux fois moindres qu'à 65 degrés. » (*Ibid.*, p. 96)

Il estime les réfractions « plus grandes quand le baromètre est haut, et qu'il y a beaucoup d'exhalaisons, et de vapeurs invisibles dans l'air, que lorsque le baromètre est bas et que l'air a été comme lavé et purgé de ces exhalaisons et de ces vapeurs » (*Ibid.*).

Densité de l'air et réfraction à la frontière éther-air ou air-air : de Kepler à Hooke, puis Newton

Johannes Kepler, au tout début du XVII^e siècle, reprend les idées échangées entre son maître Tycho Brahe et Rothmann, et bien que réceptif à la doctrine de Pena, il ne partage pas leur opinion sur le rôle supposé majeur des vapeurs proches de l'horizon, comme nous l'avons dit. Pour lui, les réfractions se produisent à la surface de « l'air que nous respirons ». Il perçoit par ailleurs comme sans objet le grossissement apparent de la Lune sur l'horizon, dont l'observation montre qu'il n'existe pas objectivement. Assimilant l'atmosphère à une couche de densité uniforme au contact avec l'éther à son sommet, il estime la hauteur de l'atmosphère à environ 3,7 km sur la base d'un modèle simple de réfraction atmosphérique (Kepler, 1953). Dans ce modèle, le rayon de lumière provenant de l'étoile subit une réfraction à la frontière éther-air, puis se propage en ligne droite jusqu'à l'observateur. La réfraction mesurée sur un trajet oblique fournit la puissance réfractive de l'air, la réfraction horizontale permettant alors de calculer la hauteur de la couche atmosphérique. La valeur trouvée est très inférieure à celle déduite de la durée des crépuscules au XI^e siècle par les savants arabes, de l'ordre de 80 km (Goldstein, 1976), désaccord que Kepler résout en invoquant trois explications possibles, que Philippe de La Hire décrit et commente un siècle plus tard (La Hire, 1716) : (i) l'occurrence de plusieurs réflexions successives, au lieu d'une seule, au sein de l'atmosphère, ce qui réduirait la hauteur déduite des crépuscules ; (ii) la réfraction atmosphérique, qui incurve les rayons et conduit à surestimer la hauteur déduite des crépuscules, (iii) la présence d'une atmosphère solaire lumineuse, augmentant artificiellement la hauteur déduite des crépuscules en négligeant cette atmosphère (voir pour les détails Chassefière, 2021b, p. 49-50). Jean-Dominique Cassini refait, à partir d'observations plus précises, le même calcul quarante ans après Kepler, publiant une première table des réfractions en 1662⁶, puis une 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. Il trouve une hauteur de 2000 toises (3,9 km), proche de celle proposée par Kepler. Delambre dit de Cassini à ce sujet qu'il avait « sur ce grand astronome [Kepler] l'avantage que lui donnait le théorème de Snellius ou de Descartes » (Delambre, 1821, tome premier, p. 801), tout en reconnaissant la supériorité en précision

⁵ Descartes relie la dureté d'un corps à la capacité qu'a la matière subtile en son sein de propager la lumière, la faible résistance des parties d'un corps mou, comme l'air, amortissant le mouvement de la matière subtile responsable de la propagation, la résistance d'un corps dur, comme le verre, donnant à la matière subtile plus de stabilité dans son mouvement et donc de pouvoir à propager la lumière. Ainsi, chez Hartsoeker comme chez Descartes, la matière subtile est-elle la clé de compréhension des propriétés de la réfraction, bien que suivant des modalités différentes. En cela, le système de la réfraction atmosphérique de Hartsoeker est d'inspiration cartésienne.

⁶ Cette première table est publiée dans les *Éphémérides* de Malvasia, voir par exemple Delambre, 1827, p. 775.

des tables de Cassini. Celles-ci sont complètes sur l'ensemble des distances zénithales variant de 0° à 90°, contrairement à celles de Tycho Brahe.

Dès 1672, Jean-Dominique Cassini mentionne ses mesures du baromètre à différentes hauteurs, à flanc de montagne à Toulon, ou entre la cave et la plateforme de l'Observatoire de Paris, les variations verticales de pression mesurées indiquant, en extrapolant (linéairement) vers le haut, que la pression devrait tomber à zéro à une altitude de 3668 toises (J.-D. Cassini, 1729, p. 373-375). Comme l'air supérieur doit être « plus rare que l'inférieur », ajoute Cassini, la hauteur de l'air devrait être supérieure à 3368 toises sur la base des mesures de pression. Or la valeur fournie par son modèle de réfraction est de 2000 toises. « Cela nous donna lieu de penser », écrit-il, « qu'il se pouvait faire que ce ne fût pas tout l'air comprimant les liqueurs, qui cause la réfraction des Astres, mais quelque substance fluide qui n'occupe que la partie inférieure de l'air, & qui se termine par une surface sphérique concentrique à la Terre » (*Ibid.*, p. 374). Ainsi, l'idée d'une matière réfractive distincte de l'air, concentrée au voisinage de la surface de la planète dans les 4 premiers kilomètres, pour expliquer le désaccord entre l'estimation de la hauteur de l'atmosphère basée sur la réfraction et celle basée sur les mesures de pression, est émise très tôt par Cassini. Celui-ci ne semble pas avoir remarqué que, compte-tenu de la diminution rapide de la densité avec l'altitude, ce sont les couches situées en bas, dans les premiers kilomètres, qui jouent un rôle prépondérant dans la réfraction atmosphérique. C'est précisément ce qu'a bien compris Robert Hooke qui écrit en 1667, dans ses *Micrographia*, que la réfraction devient négligeable au-dessus de 5 ou 6 kilomètres d'altitude (Hooke, 1667, p. 236). Il attribue à la réfraction atmosphérique, non seulement le fait que les astres apparaissent à l'horizon quand ils sont en réalité sous l'horizon, mais aussi le tremblement ou l'ondulation des objets lointains, arbres, reflets du Soleil sur un carreau, bords du Soleil... Hooke assimile l'inflexion des rayons lumineux provoquant ces effets à une « réfraction multiple », qui ne se produit pas à une frontière déterminée mais un peu partout sur le chemin optique. Il dit sa conclusion fondée sur les deux propositions suivantes :

Premièrement, qu'un *milieu*, dont les parties sont inégalement *denses*, et animées de divers mouvements et translations les unes par rapport aux autres, produira tous ces effets visibles sur les rayons de lumière, sans aucune autre cause *co-efficiente*.

En second lieu, il y a dans l'air ou dans *l'atmosphère* une grande variété dans les parties qui le constituent, tant par leur *densité* et leur *rareté* que par leurs diverses modifications et positions les unes par rapport aux autres.⁷ (*Ibid.*, p. 219)

Il continue : « Par *densité* et *rareté*, j'entends une propriété d'un corps transparent, qui réfracte plus ou moins un rayon de lumière (arrivant obliquement sur sa surface à partir d'un troisième *milieu*) vers sa perpendiculaire : comme j'appelle le verre un corps plus dense que l'eau, et l'eau un corps plus rare que le verre » et précise plus loin : « les parties de l'air sont les unes plus condensées, les autres plus raréfiées, soit par les différences de chaleur ou de pression qu'il subit, soit par les vapeurs quelque peu hétérogènes qui le parsèment » (*Ibid.*, p. 221). Pour Hooke, la réfraction est donc clairement déterminée par la densité du milieu, les vapeurs n'intervenant dans la réfraction que par leur effet pondéral sur la densité. On a vu que Huygens, à la même époque, dans le cadre de son modèle de propagation de la lumière dans l'éther, considère qu'un milieu matériel plus dense peut entraver le libre mouvement de la matière éthérée, et de ce fait créer de la réfraction, même s'il n'exclut pas que la réfraction puisse aussi tenir à la moindre élasticité des vapeurs, donc à la moindre subtilité de l'air quand il est chargé de vapeurs, dans le cas où elles participeraient activement à la propagation.

Quant à la variation diurne et saisonnière de la réfraction, que Picard puis Hartsoeker attribuent à l'effet de la variation du contenu en vapeurs de l'atmosphère, Isaac Newton, convaincu que la réfraction est affaire de densité de l'air, affirme qu'il s'agit d'un effet direct de la température sur la pression de l'air, ainsi qu'il l'exprime dans sa correspondance des années 1694-1695 avec John Flamsteed, traduite et publiée par Jean-Baptiste Biot en 1836 dans le *Journal des Savants*. Il y écrit notamment :

⁷ Traduit de l'anglais par l'auteur.

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. (Biot, 1836, p. 645-646⁸)

Il recommande à Flamsteed d'accompagner ses mesures de réfraction de mesures de la température et de la pression, et comprend par ailleurs que ce ne sont pas les vapeurs, mais bien plutôt les conditions thermiques, qui contrôlent les variations de réfraction atmosphérique :

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, 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. (*Ibid.*, p. 652⁹)

Autrement dit, l'état thermique de l'atmosphère contrôle directement la réfraction à travers son influence sur la pression atmosphérique, ainsi que le chargement en vapeurs, au lieu que ce dernier ne soit l'intermédiaire par lequel la température agit sur la réfraction. On voit que Newton, s'appuyant sur les bases posées par Hooke, renverse la causalité et élucide l'essentiel du mécanisme. Aussi bien la minceur réfractive de l'atmosphère que la cause des variations diurnes et saisonnières de la réfraction sont comprises par les savants anglais, attribuant à la seule densité des milieux l'amplitude de la réfraction, dès la fin du XVII^e siècle.

Jacques Cassini publie en 1703, dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de 1700, une traduction de l'article de John Lowthorp des *Philosophical Transactions* de 1699, relatant la mesure en laboratoire des angles de réfraction dans le verre, l'eau et l'air (J. Cassini, 1703). Ces mesures ne montrent pas de proportionnalité générale entre la pesanteur spécifique (densité) 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 atmosphérique. Lowthorp écrit à ce sujet :

L'on peut conjecturer de là que les densités de l'air et de l'eau sont proportionnelles à leurs puissances réfractives ; et 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 et à leurs raretés. (*Ibid.*, p. 82)

L'expérience de Lowthorp valide a posteriori et précise les hypothèses faites par Hooke et Newton, supposant un lien direct entre densité atmosphérique et pouvoir réfractif. Bien entendu, ces résultats confortent les tenants de l'hypothèse suivant laquelle la réfraction se produit à l'interface éther-air, et plus généralement air moins dense-air plus dense, s'opposant à l'idée développée par Tycho Brahe suivant laquelle la majeure partie de la réfraction se produit à la frontière air-vapeur, et plus généralement air moins chargé en vapeurs-air plus chargé en vapeurs. Fontenelle, dans l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences de 1700, explique que refaisant plusieurs fois l'expérience à l'Académie des Sciences française, « on trouva toujours qu'un même objet éloigné ne varioit en aucune manière soit que le rayon par lequel il étoit vu passât par le vuide & par l'air, soit qu'il ne

⁸ La version originale de cet extrait se trouve dans la lettre du 24 octobre 1694, voir Baily, 1835, p. 137.

⁹ La version originale de cet extrait se trouve dans la lettre du 16 février 1695, voir Baily, 1835, p. 151.

passat que par l'air » (Fontenelle, 1703, p. 115), autrement dit que l'expérience anglaise est fautive et que la lumière ne subit aucune réfraction en passant du vide à l'air. Et Fontenelle de juger que « peut-être n'est-il pas impossible que les réfractions célestes se fassent non pas dans le passage de la Matière Éthérée à notre Atmosphère mais dans le passage d'une couche supérieure de l'Atmosphère à une inférieure plus épaisse » (*Ibid.*, p. 116). Le soutien de Fontenelle au système français d'inspiration cartésienne développé par Hartsoeker dans la continuité des idées de Picard est ici parfaitement clair, révélant une ligne de fracture entre la sphère cartésienne à l'Académie Royale des Sciences et le groupe des savants anglais entourant Newton. Il faut attendre 1719, année où Joseph-Nicolas Delisle reproduit avec succès l'expérience anglaise, et mesure grâce à l'utilisation d'un baromètre la loi de dépendance de la réfraction vis-à-vis de la pression (Delisle, 1721), pour que Fontenelle admette la vérité des faits : « La refraction astronomique est celle que les rayons souffrent en passant de la matière éthérée dans l'Atmosphère. Comme l'Atmosphère augmente toujours de densité depuis sa surface la plus extérieure jusqu'à la plus intérieure, qui enveloppe la Terre, il se fait à chaque couche une refraction nouvelle » (Fontenelle, 1721, p. 73-74). L'expérience tranche donc en faveur de la pesanteur au détriment de la subtilité, infirmant le paradigme posé par Tycho Brahe plus d'un siècle auparavant.

Discussion

Ainsi la question de la réfraction atmosphérique est-elle à la fin du XVII^e siècle pour l'essentiel comprise outre-Manche, grâce principalement aux travaux de Hooke et de Newton. Le système qui suppose la réfraction contrôlée par la densité de l'air, qu'il soit pur ou grossier (mêlé de vapeurs et d'exhalaisons), permet d'expliquer, à la fois la faible épaisseur de l'atmosphère « réfractive » (telle que calculée par Kepler, puis J.-D. Cassini) et les variations diurnes et saisonnières de la réfraction via l'effet de la température sur la répartition verticale de la densité atmosphérique. 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. Il faudra attendre le milieu du XVIII^e 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. Notons au passage que Biot considère Newton comme « le créateur de la théorie des réfractions astronomiques comme il l'est de la théorie de la gravitation » (Biot, 1836, p. 655). La table calculée par Newton, telle que publiée par Edmund Halley en 1721 (Halley, 1723, p. 172), rend cependant moins bien compte des observations que la dernière table de J.-D. Cassini publiée en 1684 (Maheu, 1966, p. 215), qui restera la référence dans la *Connaissance des Temps* jusqu'en 1765¹⁰.

On ne peut pas dire que le système proposé par Hartsoeker, dans la filiation de Tycho Brahe puis Picard, atteigne le même niveau de cohérence. Nous avons vu que Jean-Dominique Cassini, dès les années 1670, trouvant un désaccord entre la valeur de la hauteur de l'atmosphère déduite de son modèle de réfraction et celle extrapolée à partir des mesures de pression à différentes hauteurs, donc pour une raison totalement indépendante de l'attribution de la réfraction atmosphérique aux particules, suggère que la réfraction pourrait être le fait d'une matière réfractive spécifique distincte de l'air. La pensée anglaise en matière de réfraction, suite à la traduction faite par Jacques Cassini de l'article déjà cité de Lowthorp, pénètre quelque peu le milieu académique français. Dès 1702, Philippe de la Hire reprend l'idée d'une proportionnalité entre densité et pouvoir réfractif pour calculer la forme de la courbe suivie par un rayon lumineux dans l'atmosphère (La Hire, 1704). En 1714, Jacques Cassini ré-estime avec les mêmes hypothèses la hauteur réfractive de l'atmosphère, et déduit une valeur de 14 km (J. Cassini, 1714), supérieure à celle trouvée par son père dans l'hypothèse d'une atmosphère homogène (3,9 km). Néanmoins, l'estimation de la hauteur de l'atmosphère à partir des mesures de pression a entre-temps progressé, s'établissant maintenant à 12800 toises¹¹ (Maraldi, 1705), et non plus 3368 toises comme en 1672, presque le double de la hauteur réfractive trouvée par Jacques

¹⁰ « Les tables des réfractions astronomiques dans la *Connaissance des temps* », <https://cdt.imcce.fr/exhibits/show/les-tables-des-r--fractions-as/>

¹¹ Soit 26 km.

Cassini à partir de son modèle de réfraction. Le hiatus entre hauteur réfractive et hauteur déduite de la pression subsiste, ce qui fait écrire à Fontenelle : « En prenant donc pour un arc de cercle la courbe décrite par le rayon rompu, et la réfraction horizontale étant toujours de 32'20'', 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 » (Fontenelle, 1717, p. 65-66), admettant explicitement, puisqu'il la nomme, l'existence de cette matière réfractive. Notons cependant les réserves émises par certains proches de Cassini, comme Jacques-Philippe Maraldi qui écrit en 1703 à propos des observations du père Jésuite Antoine Laval : « 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, 1705, p. 237). L'important travail de modélisation analytique de la réfraction réalisé quelques temps plus tard par Pierre Bouguer à partir du concept de matière réfractive, utilisant la toute récente analyse infinitésimale inventée par Newton et Leibniz, illustre parfaitement la remarque de Maraldi (Bouguer, 1729). Dans l'article de 1714, Fontenelle attribue néanmoins 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 (*Ibid.*, p. 67), donnant ainsi un rôle à la fois à la matière réfractive et aux particules, alors même que quelques années plus tôt à propos des mesures de hauteur de l'horizon de la mer par le père Laval, il écrivait :

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, et c'est ce que M. Cassini et 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. » (Fontenelle, 1707, p. 103)

On voit les hésitations sur cette question dans la sphère académique française durant les vingt premières années du XVIII^e siècle. Les observations complètes de l'horizon de la mer publiées en 1718 par Laval n'apporteront pas de confirmation d'un lien entre particules et réfraction, même si l'idée de ce lien apparaît souvent en filigrane dans son propos (Laval, 1718), traduisant bien la difficulté qu'éprouvent les savants français de l'époque à renoncer à l'hypothèse tychonienne, même si certains d'entre eux, comme Philipe de la Hire ou Jacques Cassini, accordent dès le départ du crédit aux mesures de Lowthorp, qu'il faudra néanmoins vingt ans à la communauté académique française dans son ensemble pour pleinement admettre. L'idée d'une matière réfractive, introduite à l'origine par Jean-Dominique Cassini, offre néanmoins une porte de sortie intéressante. Si plusieurs autres raisons concourent à convaincre les savants français de l'existence de cette matière réfractive (Chassefière, 2021b, p. 54-69), il est certain que le hiatus entre théorie et observation, dans cette époque où s'affirme la démarche expérimentale, est l'argument principal pour inventer la matière réfractive, qui par ailleurs offre de belles perspectives à ceux qui veulent appliquer le calcul infinitésimal à la question de la réfraction atmosphérique (Mayrargue, 2009). Il faudra un siècle pour que tirant parti d'importants progrès analytiques, incluant la prise en compte rigoureuse de la température, Pierre-Simon de Laplace, au tournant du XIX^e siècle, n'enterre définitivement ce concept (Laplace 1805).

Conclusion

La publication en 1703, dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de 1700, de la traduction par Jacques Cassini de l'article de Lowthorp paru l'année précédente dans les *Philosophical Transactions* portant sur la validation expérimentale de la loi de proportionnalité entre densité et pouvoir réfractif montre, d'une part que Cassini, qui est astronome et particulièrement sensibilisé aux questions de réfraction atmosphérique, suit de très près ce qui se fait en Angleterre, d'autre part que l'Académie accorde à cette question la plus haute importance. Le fait que l'expérience soit refaite la même année par plusieurs savants de l'Académie confirme cet intérêt. Fontenelle, on l'a vu, suite à l'échec de la répétition à Paris de l'expérience, mentionne qu'il existe encore une possibilité pour que

la réfraction suivit le système basé sur le contenu atmosphérique en vapeurs. Il faudra néanmoins près de vingt ans pour que l'expérience soit réalisée, cette fois avec succès, par Delisle, qui en publie les résultats en 1721, conduisant Fontenelle à accepter le système qui lie directement densité du milieu et réfraction. Entre 1700 et 1721, dans une longue période où rien de plus n'est tenté pour s'assurer de la véracité des résultats de Lowthorp, Cassini et Laval s'aperçoivent par l'observation, dès 1706, que la présence de vapeurs particulières (notamment celles des nuages) ne se traduit par aucune augmentation de la réfraction, ce qui les conduit à confirmer l'intuition de Cassini de l'existence d'une matière réfractive cachée¹². Quelques années plus tôt, Philippe de La Hire, à propos de l'observation d'une réfraction horizontale double en Laponie, avait écrit : « 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 et à Paris les mêmes changements du mercure dans le tuyau du baromètre, et qu'on y a aussi observé les mêmes hauteurs à très peu près » (La Hire, 1703, p. 38). Autrement dit, la matière réfractive ne pèse pas dans le baromètre, elle traverse les pores du verre, elle est une matière subtile au sens que Descartes donne à la matière éthérée à la base de son système tourbillonnaire du monde. L'idée de la matière réfractive est intimement cartésienne dans son inspiration tout comme l'était sur un autre plan, celui de la dioptrique, la théorie développée par Hartsoeker. Ainsi, la direction de l'Académie, sous la plume de Fontenelle et des savants de l'entourage proche de Cassini, remplace-t-elle un modèle d'inspiration cartésienne par un autre, dans un souci dont on peut raisonnablement penser qu'il est d'affirmer la spécificité française dans le contexte déjà mentionné d'opposition entre cartésiens et newtoniens, Newton ayant lui-même œuvré dans l'étude de la réfraction, et Hooke étant également un savant de premier plan. Le maintien du principe de l'existence de la matière réfractive, même après que l'expérience de Delisle de 1719 ait validé a posteriori l'approche anglaise de la réfraction atmosphérique, qui n'a nul besoin de faire appel à une telle hypothèse, nous semble s'inscrire dans une logique offensive de sauvegarde de l'héritage cartésien. Après vingt années de maturation, l'idée de la matière réfractive est suffisamment bien implantée dans le système de pensée des savants cartésiens de l'Académie pour que l'expérience réussie de Delisle ne conduise pas à réviser l'hypothèse de la matière réfractive, qui restera prégnante dans une partie du monde savant français durant tout le XVIII^e siècle.

¹² Ceci est mentionné par Fontenelle dans l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences (Fontenelle, 1707), mais pas dans l'article de Jacques Cassini auquel renvoie l'article de Fontenelle dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de la même année (Cassini, 1707), semblant indiquer que cette absence apparente d'effet des nuages sur la réfraction n'a été communiquée à Fontenelle qu'oralement par Cassini, ce dernier ne la mentionnant pas dans son article.

Références

- Arago François (1855), *Oeuvres de François Arago*, Tome troisième, Paris, Gide et J. Baudry, Leipzig, T.O. Weigel.
- Auzout Adrien (1667), « Extrait d'une lettre de Monsieur Auzout du 28 Decembre 1666. à M. Oldembourg de la Société Royale d'Angleterre, touchant la manière de prendre le diametre des Planetes [...] », Paris, Jean Cusson, p. 2-4.
- Baily Francis (1835), *An account of the Rev^d John Flamsteed, The First Astronomer-Royal*, London, 129-160.
- Barker Peter (1985), « Jean Pena (1528-58) and stoic physics in the sixteenth century », *The Southern Journal of Philosophy*, n° XXIII, Supplement, p. 93-107.
- Bernier François (1684), *Abrégé de la philosophie de Gassendi*, seconde édition, Tome III, Lyon, Anisson, Posuel & Rigaud.
- Bigourdan Guillaume (1895), *Inventaire général et sommaire des manuscrits de la Bibliothèque de l'Observatoire de Paris*, Paris, Observatoire de Paris.
- Biot Jean-Baptiste (1836), « 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 ». *Journal des Savants*, novembre 1836, Troisième article, Paris, Imprimerie Royale, p. 641-658.
- Borghero Carlo (2011), *Les cartésiens face à Newton. Philosophie, science et religion dans la première moitié du xviii^e siècle newtoniens*, Turnhout, Brepols.
- Bouguer Pierre (1729), *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*, Paris, Claude Jombert.
- Cassini Jean-Dominique (1729), « Observations astronomiques faites en divers endroits du Royaume en 1672. Par M. Cassini », *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences depuis 1666 jusqu'à 1699*, Tome VII, Partie I, Paris, Compagnie des libraires, p. 349-378.
- Cassini Jacques (1703), « De la Réfraction de l'air, faite par l'ordre de la Société Royale d'Angleterre » (traduction de l'article de J. Lowthorp paru dans les *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* de 1699 publiés en 1700). *MARS* 1700, p. 78-83.
- Cassini Jacques (1706), « Réflexions sur les règles de la condensation de l'air », *MARS* 1705, p. 61-74.
- Cassini Jacques (1707), « Réflexions sur les observations envoyées à Monsieur le Comte de Pontchartrain par le père Laval Professeur Royal d'Hydrographie », *MARS* 1706, p. 78-82.
- Cassini Jacques (1711), « Des réfractions astronomiques », *MARS* 1714, p. 33-52.
- Chassefière Éric (2021a), « Conceptions de l'atmosphère et nature de l'air au XVIII^e siècle : L'héritage cartésien », *Revue d'Histoire des Sciences*, n°74 (2), p. 407-439.
- Chassefière Éric (2021b), *Physics of the Terrestrial Environment, Subtle Matter and Height of the Atmosphere. Conceptions of the Atmosphere and the Nature of Air in the Age of Enlightenment*, London/ Hoboken, ISTE/Wiley.
- Crépel Pierre et Schmit Christophe (2017), *Autour de Descartes et Newton*, Paris, Hermann.
- Delambre Jean-Baptiste Joseph (1821), *Histoire de l'astronomie moderne*, tomes premier et second, Paris, M^{me} V^e Courcier.
- Delambre Jean-Baptiste Joseph (1827), *Histoire de l'astronomie au dix-huitième siècle*, Paris, Bachelier.
- Delisle Joseph-Nicolas (1721), « Détail de l'expérience de la réfraction de l'air dans le vuide », *MARS* 1719, p. 330-335.
- Descartes René (1824), *La Dioptrique (1637), Œuvres de Descartes, publiées par Victor Cousin*, tome cinquième, Paris, F. G. Levrault.
- Fontenelle Bernard le Bovier de (1703), « Sur la prolongation de la Méridienne de Paris, » *HARS* 1700, p. 123-127.
- Fontenelle Bernard le Bovier de (1707), « Sur les réfractions », *HARS* 1706, p. 101-103.
- Fontenelle Bernard le Bovier de (1717), « Sur les réfractions astronomiques », *HARS* 1714, p. 61-67.
- Fontenelle Bernard le Bovier de (1721), « Sur la réfraction du vuide dans l'air », *HARS* 1719, p. 71-74.
- Fontenelle Bernard le Bovier de (1727), « Éloge de Monsieur Hartsoeker », *HARS* 1725, p. 137-153.

- Furetière Antoine (1690-1701). *Dictionnaire Universel, Contenant généralement tous les mots français, tant vieux que modernes, et les Termes de toutes les Sciences et des Arts*, La Haye et Rotterdam Arnout et Reinier Leers,.
- Goldstein Bernard R. (1976), « Refraction, twilight, and the height of the atmosphere », *Vistas in Astronomy*, n°20, p. 105-107.
- Guerlac Henri (1981), *Newton on the continent*, Ithaca/London, Cornell University Press.
- Halley Edmund (1723), “Some Remarks on the Allowances to be made in Astronomical Observations for the Refraction of the Air”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1721, n°31 (368), p. 169-172.
- Hartsoecker Nicolas (1694). *Essai de Dioptrique*. Paris, Jean Anisson.
- Hooke Robert (1667), *Micrographia : or some Physiological Descriptions of Minute Bodies made by magnifying glasses with Observations and Inquiries thereupon*, John Martyn, London.
- Huygens Christian (1690), *Traité de la lumière où sont expliquées les causes de ce qui lui arrive dans la réflexion et dans la réfraction, et particulièrement dans l'étrange réfraction du Cristal d'Irlande, Avec un Discours de la Cause de la Pesanteur*, Leide, Pierre Vander.
- Kepler Johannes (1604), *Ad Vitellionem Paralipomena, quibus Astronomiæ Pars Optica Traditur ; potissimum De Artificiosa Observatione et Æstimatione Diametrorum, deliquiorumque Solis et Lunæ*, Francfort, C. de Marne & Hæredes J. Aubry.
- Kepler Johannes (1953), *Epitome Astronomiæ Copernicanae* (1615-1621), in *Gesammelte Werke*, vol. 7, Munich, M. Caspar.
- La Hire Philippe de (1703), « Remarques sur les observations des réfractions tirées du livre intitulé *Refractio Solis in occidui in Septentrionalibus oris, juffu Caroli X I. Regis Suevorum*, c. à Joanne Bilberg Holmiae », *MARS* 1700, p. 37-38.
- La Hire Philippe de (1704), « Suite de l'examen de la ligne courbe, que décrivent les rayons de lumière en traversant l'Atmosphère », *MARS* 1702, p. 182-187.
- La Hire Philippe de (1716), « Sur la hauteur de l'atmosphère », *MARS* 1713, p. 54-66.
- Laplace Pierre-Simon de (1805), « Chapitre Premier. Des réfractions astronomiques », *Œuvres complètes*, Livre X, Tome quatrième, Paris, Gauthier-Villars, p. 233-277.
- Laval Antoine (1718), « Observations sur la Réfraction faites à l'Observatoire des RR. PP. jésuites de Sainte Croix à Marseille, avec des réflexions sur ces Observations », *Mémoires pour l'Histoire des Sciences et des beaux Arts*, Trévoux, Etienne Ganeau, p. 356-405
- Lehn Waldemar H., Van der Werf Siebren (2005), « Atmospheric refraction : a history », *Applied Optics*, n°44, p. 5624-5636.
- Lowthorp John (1700), “An experiment of the Refraction of the Air made at the Command of the Royal Society”, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1699, n°21 (257), p. 339-342.
- Maheu Gilles (1966), « La vie scientifique au milieu du XVIIIe siècle : Introduction à la publication des lettres de Bouguer à Euler », *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, n°19 (3), p. 206-224.
- Malebranche Nicolas (1693), *Réponse du P. Malebranche, prestre de l'oratoire, à M. Régis*, Paris, André Pralard.
- Maraldi Jean-Philippe (1705), « Expériences du baromètre faites sur diverses montagnes de la France », *MARS* 1703, p. 229-237.
- Mayrargue Arnaud (2009), « Air, lumière et matière réfractive », *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, n°44, p. 47-60.
- Mazauric Simone (2010), « Louis Rougier, De Torricelli à Pascal (1927) », *Philosophia Scientiæ*, n°14, 2. Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/philosophiascientiæ/172>. [Consulté le 6 octobre 2021].
- Mersenne Marin (1634), *Les questions théologiques, physiques, morales et mathématiques*, Paris, Henry Guenon.
- Péoux Gerald (2010), « L'homme, l'air et les réfractions à la fin du XVI^e siècle », *Bulletin de l'Association Guillaume Budé*, n°2, p. 227-250.
- Petit Pierre (1667), « Extrait d'une lettre de M. Petit Intend. des Fortific. &c au R. P. de Billy de la Comp. De Jesus, Touchant une nouvelle machine pour mesurer exactement les Diametres des Astres, du 12 mars 1667 », *Le Journal des Savants*, Amsterdam, Pierre Le Grand, p. 130-143.
- Picard Jean (1671), *Mesure de la Terre*, Paris, Imprimerie Royale.

- Picard Jean (1680), *Voyage d'Uranibourg ou Observations Astronomiques faites en Dannemarck*, Paris, Imprimerie Royale.
- Picard Jean (1729), « Observations astronomiques faites en divers endroits du Royaume, en 1672, 1673, 1674. Par M. Picard », *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences depuis 1666 jusqu'à 1699*, Tome VII, Partie I, Paris, Compagnie des libraires, p. 329-348.
- Plug Cornelis, Ross Helen E. (1989), « Historical Review », dans *The Moon illusion*, dir. Maurice Hershenson, Hillsdale, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, p. 5-30.
- Régis Pierre-Sylvain (1691), *Cours entier de philosophie*, Livre huitième, Chapitre XXXI, Amsterdam, Huguëtan, p. 241-246.
- Shank John Bennett (2008), *The Newton Wars and the beginning of the French Enlightenment*, Chicago, University of Chicago Press, p. 114-120.
- Tycho Brahe (1610), *Astronomiæ Instauratæ Progymnasmata, quorum haec Prima Pars, De Restitutione Motuum, Solis & Lunae, Stellarumque inerrantium tractat*, Francfort, apud Godefridum Tampachium.