



**HAL**  
open science

# Relevés de température et méthodes d'étalonnage des thermomètres à l'Observatoire de Paris (1683-1732)

Eric Chassefière

► **To cite this version:**

Eric Chassefière. Relevés de température et méthodes d'étalonnage des thermomètres à l'Observatoire de Paris (1683-1732). *La Météorologie*, 2022, 118, pp.31-41. 10.37053/lameteorologie-2022-0082 . hal-03808502

**HAL Id: hal-03808502**

**<https://cnrs.hal.science/hal-03808502v1>**

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.

# RELEVÉS DE TEMPÉRATURE ET MÉTHODES D'ÉTALONNAGE DES THERMOMÈTRES À L'OBSERVATOIRE DE PARIS (1683-1732)

E. CHASSEFIÈRE

SYRTE, Observatoire de Paris-Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE, 61 avenue de l'Observatoire, F-75014 Paris, France. Tel. : 01 40 51 22 03, e-mail : eric.chassefiere@obspm.fr.

**Résumé :** Cet article présente les mesures de température atmosphérique figurant dans les journaux d'observation des astronomes de l'Observatoire de Paris entre 1683 et 1732, en se focalisant sur le préalable indispensable que constitue l'étalonnage des thermomètres utilisés pour pouvoir convertir les données en °C. À cette fin, nous caractérisons chacun des trois thermomètres à alcool utilisés, possédant son propre système de graduations, par deux températures de référence, celle observée dans les caves de l'Observatoire et celle mesurée quand l'eau gèle à proximité du lieu de la mesure. Nous obtenons ainsi une précision absolue sur les températures restituées de l'ordre de  $\pm 1$  °C entre 0 et 20°C,  $\pm 2$  °C aux extrêmes. Une exploration préliminaire des données montre des écarts significatifs entre nos températures restituées et celles des séries historiques existantes, incitant à entreprendre une analyse plus détaillée du jeu de données de l'Observatoire, permettant notamment de combler le chaînon manquant de mesures de température *in situ* à Paris entre 1713 et 1732.

**Title :** TEMPERATURE READINGS AND METHODS OF CALIBRATION OF THERMOMETERS AT THE PARIS OBSERVATORY (1683-1732)

**Abstract :** This article presents the atmospheric temperature measurements in the observation journals of the astronomers of the Paris Observatory between 1683 and 1732, focusing on the indispensable prerequisite of the calibration of the thermometers used to convert the data into °C. To this end, we characterize each of the three alcohol thermometers used, having its own system of graduations, by two reference temperatures, the one observed in the cellars of the Observatory and the one measured when the water freezes in the vicinity of the place of the measurement. We thus obtain an absolute precision on the temperatures returned of the order of  $\pm 1$ °C between 0 and 20°C,  $\pm 2$ °C at the extremes. A preliminary exploration of the data shows significant discrepancies between our reconstructed temperatures and those of the existing historical series, prompting a more detailed analysis of the Observatory's dataset, allowing in

particular to fill in the missing link of in situ temperature measurements in Paris between 1713 and 1732.

## Introduction

Le *Journal des observations faites à l'Observatoire Royal de Paris et au château de Thury*, intégralement accessible sur la *Bibliothèque numérique de l'Observatoire de Paris* et qui couvre la période 1683-1798, fournit pendant de très longs intervalles de temps des informations quotidiennes sur la température et la pression, parfois complétées par des annotations sur l'état du ciel, la direction du vent, la pluie ou la neige, ou encore le gel, écrites des mains successives des Cassini, ou de leurs collaborateurs, sur quatre générations. Nous nous intéressons dans cet article aux données de température reportées dans les journaux pour la période 1683-1732 (registres D3/1-30 pour 1683-1717, D4/1-6 pour 1718-1732). Le jeu de données considéré ici prend fin le 28 février 1732, date au-delà de laquelle plus aucune mesure n'est reportée dans les journaux jusqu'au 17 janvier 1746, quand les relevés reprennent à l'aide d'un thermomètre dont il est écrit qu'il est de Réaumur (D4/12), sans qu'il soit possible d'inter-étalonner de manière cohérente ce thermomètre et le précédent, raison pour laquelle nous n'allons pas, dans la présente étude, au-delà de l'année 1732. Notons que la période 1732-1757 a été documentée grâce aux mesures réalisées par Réaumur (Rousseau, 2019). Il existe par ailleurs quelques données de température pour la période 1671-1673 reportées dans les journaux D1/1-5 intitulés *Cassini I, Journal des observations faites à l'Observatoire royal de Paris*. Trois thermomètres sont utilisés successivement par Jean-Dominique Cassini, puis son fils Jacques : (i) un thermomètre d'origine non précisée en 1671-1673 (noté Ther1), (ii) un thermomètre de Hubin (voir par ex. Martine, 1751, p. 47-48) entre 1683 et 1705 (noté Ther2), (iii) un thermomètre d'Amontons (Amontons, 1703) entre 1705 et 1732 (noté Ther3). Nous ne mentionnons ici la période 1671-1673 que par souci d'exhaustivité, les données correspondantes ne présentant qu'un intérêt limité du fait de leur caractère lacunaire, et de l'impossibilité d'étalonner le thermomètre utilisé de manière indépendante.

Nous décrivons d'abord la façon dont nous avons étalonné les thermomètres de Hubin et d'Amontons utilisés successivement par Jean-Dominique Cassini (aussi appelé Cassini I), puis son fils Jacques (Cassini II), à partir des températures mesurées par ces thermomètres, d'une part dans les caves de l'Observatoire, d'autre part quand l'eau gèle aux environs du lieu de la mesure. Ayant déterminé ces températures de référence de façon cohérente, notamment en nous servant du thermomètre de Hubin utilisé par Philippe de La Hire, le premier astronome officiellement en charge à l'Observatoire des relevés météorologiques pour publication dans les volumes annuels de l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences (que nous appellerons « volumes de l'Histoire » dans la suite), dont certaines mesures peuvent être comparées à celles faites par les Cassini sur

leurs thermomètres, nous évaluons l'intervalle de confiance typique sur nos restitutions de température. Puis nous présentons brièvement le journal lui-même, en termes de finalité des relevés météorologiques dans le cadre d'une activité tournée prioritairement vers l'observation astronomique, et de quantité d'informations météorologiques disponible. Enfin, nous comparons à titre d'investigation préliminaire quelques séries obtenues à partir du journal aux séries existantes, à savoir celles dérivées des mesures de Louis Morin (Legrand et Le Goff, 1992), qui s'interrompent en 1712, et la *Série des moyennes mensuelles et annuelles des températures parisiennes de juin 1658 à mai 2012* (Annexe 1 dans Rousseau, 2013), que nous notons SMMA dans la suite, et montrons l'existence d'écarts significatifs et de distorsions inter-saisonnières qui nous semblent appeler une analyse exhaustive de ces données encore inexploitées, permettant d'enrichir l'étude du climat sur la période considérée.

### **La température de référence fournie par les caves de l'Observatoire**

Edme Mariotte place à l'automne 1670 un thermomètre dans les caves de l'Observatoire de Paris, à une profondeur de 84 pieds (25 mètres), et en observe durant près de deux ans, entre le 6 décembre de la même année et le 15 septembre 1672, les variations (Mariotte, 1740). Il note que la température dans les caves reste voisine de 53 degrés, pour ce thermomètre à « esprit de vin » (l'éthanol, obtenu par distillation du vin) qu'on peut raisonnablement attribuer à l'émailleur d'origine anglaise Louis Hubin, fournisseur de l'Académie Royale des Sciences dont les thermomètres marquent autour de 50 degrés dans les caves de l'Observatoire et 25 degrés à la congélation de l'eau (Martine, 1751). Les variations de la température des caves enregistrées par Mariotte sur ses deux années d'observation s'inscrivent dans une fourchette de  $\pm 0,5$  degré autour de 53 degrés. Il est possible d'estimer ces variations en degrés Celsius en se servant des relevés d'un deuxième thermomètre, à l'évidence aussi un thermomètre de Hubin, que Mariotte plaça à la fenêtre d'une maison parisienne, et dont il releva régulièrement la température entre le 16 novembre 1674 et le 25 janvier 1677 (Mariotte, 1740). Le 17 décembre 1674, la température relevée par Mariotte est de 28 degrés avec une indication de *dégel* (on est donc au voisinage de 0°C), et durant le printemps et l'été 1676 le thermomètre monte jusqu'à des valeurs de 83 degrés avec une indication de *Grand chaud* le 5 juin et de 93 degrés avec une indication de *Très-grand chaud* le 1<sup>er</sup> juillet. La température au *Très-grand chaud* se situe donc 65 degrés au-dessus de 0°C, et 2 degrés correspondent en ordre de grandeur à 1°C (pour une température plausible au *Très-grand chaud* de 30-35°C). En appliquant cette correspondance au thermomètre placé dans les caves, la

variabilité temporelle de la température des caves de l'Observatoire apparaît de l'ordre de  $\pm 0,25^\circ\text{C}$ .

Louis Hubin a également fourni au début de la décennie 1670 le thermomètre qui sera utilisé par Philippe de La Hire et ses successeurs jusqu'au milieu du 18<sup>e</sup> siècle pour l'établissement des relevés quotidiens de température, qu'accompagnent des relevés de pression et de précipitations, dans le cadre de l'activité qu'on pourrait qualifier de service météorologique de l'Observatoire de Paris. Ce thermomètre, placé dans les caves de l'Observatoire, indique 48 degrés, valeur que La Hire cite de nombreuses fois dans ses comptes rendus publiés annuellement dans les volumes de l'Histoire en la présentant comme un terme invariable (voir par ex. La Hire, 1710, p. 10). Le thermomètre utilisé par Cassini I pour ses mesures de température reportées dans les journaux d'observations postérieurs à 1683 (D3/1-30), thermomètre cassé à l'été 1705, est encore un thermomètre de Hubin, dont il mentionne régulièrement qu'il se tient à 54,5 degrés dans les caves, cette valeur étant cependant sujette à de petites fluctuations, ainsi qu'en témoignent ses notes du 14 septembre 1696 (D3/15) et du 13 juillet 1702 (D3/20), qui conduisent à retenir une valeur de  $55 \pm 0,5$  degrés, l'amplitude de la fluctuation temporelle étant du même ordre que celle mesurée par Mariotte (Fig. 1). Les relevés originaux de température de La Hire ont été perdus, et nous ne disposons pas d'éléments sur la variabilité de l'indication de son thermomètre dans les caves.

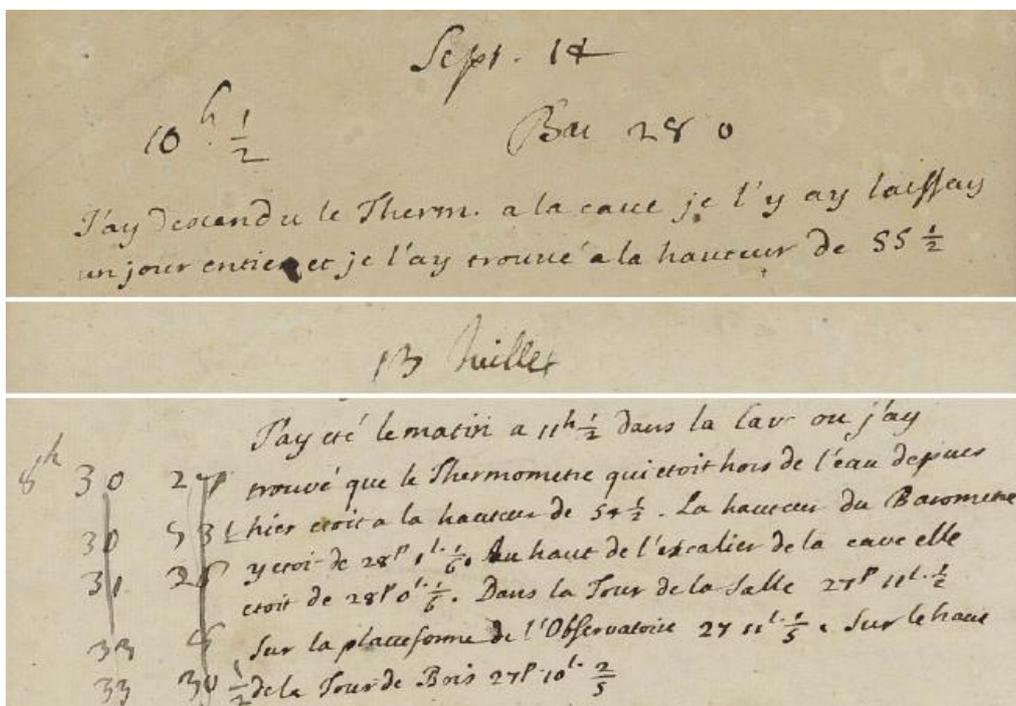


Figure 1 : Extraits des journaux de Cassini mentionnant des relevés de température dans les caves (D3/15, D3/20).

En 1688, Jacques d'Alencé fournit une méthode pour graduer les thermomètres à esprit de vin, préconisant de marquer le niveau de l'alcool correspondant à la congélation de l'eau (0°C), et celui correspondant à la température fixe d'une cave profonde (d'Alencé, 1688). À partir de ces deux points de calage, pour peu que tous les thermomètres soient étalonnés dans la même cave, les mesures de ces thermomètres deviennent directement comparables. Au cours du 18<sup>e</sup> siècle, de très nombreux thermomètres ont effectivement donné lieu à une mesure de la température dans les caves de l'Observatoire et dans la glace fondante (voir par ex. Lavoisier, 1776, le tableau p. 376-377), permettant le double calage préconisé par d'Alencé. En vue de pouvoir utiliser les relevés de température effectués sur les deux thermomètres successifs des Cassini, et le thermomètre de La Hire, il est nécessaire de connaître précisément la valeur en degrés Celsius de la température des caves de l'Observatoire à l'époque. C'est en 1730 qu'une valeur de la température des caves directement convertible en degrés centigrades est pour la première fois proposée par René-Antoine Ferchaud de Réaumur à partir d'un thermomètre à esprit de vin calé sur la congélation de l'eau (0°C) et sur sa température d'ébullition (100°C) :

On a trouvé que le degré de chaleur de ces caves étoit à 10 degrés  $\frac{1}{4}$  au dessus du terme de la congélation dans un thermometre dont le volume de la liqueur condensée par la congélation artificielle étoit 1000, & dont le volume de cette liqueur dilatée par l'eau bouillante étoit 1080, ou, ce qui revient au même, le volume de la liqueur de ce thermometre, qui est réduit à 1000, par la congélation de l'eau, est 1010  $\frac{1}{4}$  dans les caves de l'Observatoire (Réaumur, 1730, p. 503).

Il ressort directement de ce résultat que la température des caves en degrés centigrades devrait être en 1730 de 12,8°C. Mais, comme l'a noté Louis Deluc (Deluc, 1772), le degré 1080 du thermomètre de Réaumur correspond à la température de la liqueur du thermomètre « lorsqu'elle ne peut plus s'échauffer davantage sans bouillir », et non pas aux 100°C de l'eau bouillante. Réaumur se heurtait en effet au fait que la liqueur de son thermomètre (esprit de vin, c'est-à-dire éthanol, rectifié d'eau) plongé dans l'eau bouillante se mettait à bouillir avant que l'eau n'atteigne l'ébullition (l'éthanol pur bout à 78,4°C), ce qui l'empêchait de mesurer précisément la dilatation du liquide à 100°C. Deluc consacre un long développement à cette question (Deluc, 1772, p. 352-377) pour conclure que la température des caves sur un thermomètre de Réaumur correctement étalonné, c'est-à-dire sur la vraie température de l'eau bouillante, serait de 9,5°, au lieu de 10,25°, ce qui donne 11,8°C, au lieu de 12,8°C. Nous présentons dans l'annexe 1 une représentation *a priori* cohérente de l'évolution de la température des caves de l'Observatoire depuis la fin du 17<sup>e</sup> siècle. Nous retiendrons pour la présente étude 11,8°C comme valeur de la température dans les caves durant la période qui nous intéresse.

## La température de référence correspondant à la congélation de l'eau

La deuxième température de calage, à savoir celle de la congélation de l'eau (que nous appellerons température de gel), est plus difficile à déterminer pour chacun des thermomètres qui nous intéressent, en l'occurrence au nombre de trois : le thermomètre de Hubin de La Hire (noté TherLH), réalisé dans les années 1670 et qui demeure en fonctionnement presque un siècle, étant utilisé jusqu'en 1753 pour les relevés météorologiques de l'Observatoire, le thermomètre de Hubin de Cassini I, également réalisé dans les années 1670, et le thermomètre d'Amontons, réalisé vers 1703-1704, qui prend le relai du précédent à compter du 6 août 1705, lorsque ce dernier éclate sous l'effet de la chaleur (D3/21). Un inter-étalonnage précis des deuxième et troisième thermomètres de Cassini, celui de Hubin (Ther2) suivi de celui d'Amontons (Ther3), est rendu possible par le fait que le thermomètre d'Amontons est placé au voisinage du thermomètre de Hubin à la fenêtre nord du cabinet des Cassini dès le 8 juillet 1704, plus d'un an avant que le thermomètre de Hubin n'éclate et que les valeurs des deux thermomètres sont systématiquement reportées ensemble, de façon quasi-quotidienne, dans le journal (D3/22-23). Les valeurs indiquées par les deux thermomètres peuvent être directement corrélées (Fig. 2).

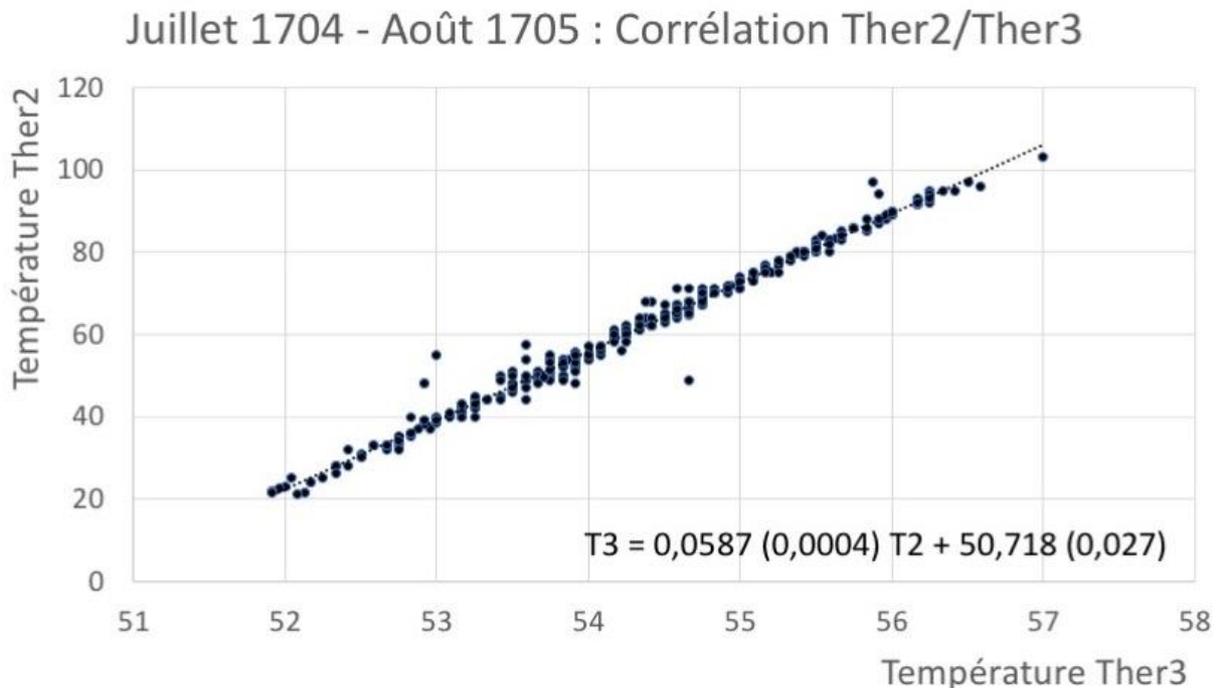


Figure 2 : Corrélation entre les séries des températures obtenues sur les deux thermomètres entre le 8 juillet 1704 et le 6 août 1705 (D3/22-23).

La relation reportée sur la figure permet d'établir une correspondance précise entre les températures de la période [1683-1705] et celles de la période [1705-1731]. Cette corrélation ne fait par ailleurs apparaître aucune non-linéarité significative de l'un ou de l'autre thermomètre dans la gamme couverte ( $\approx 0^{\circ}\text{C}$ - $30^{\circ}\text{C}$ ), problème fréquemment rencontré à l'époque du fait de la non cylindricité parfaite des tubes utilisés. À la valeur de la température des caves mesurée par Ther2 ( $55 \pm 0,5$ ) correspond une valeur de  $53,95 \pm 0,05$  pour Ther3, en tenant compte dans le calcul de la barre d'erreur liée aux incertitudes sur les coefficients de la relation liant les températures (entre parenthèses dans la formule reportée sur la figure 2).

Nous disposons, pour estimer les températures de gel de Ther2 et Ther3 d'une information fournie dans le journal de 1716 (D3/29) sur la comparaison directe, dans une période de chute brutale de la température très au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$  (20-22 janvier 1716), des températures indiquées par Ther3 à celles fournies par TherLH (Fig. 3).

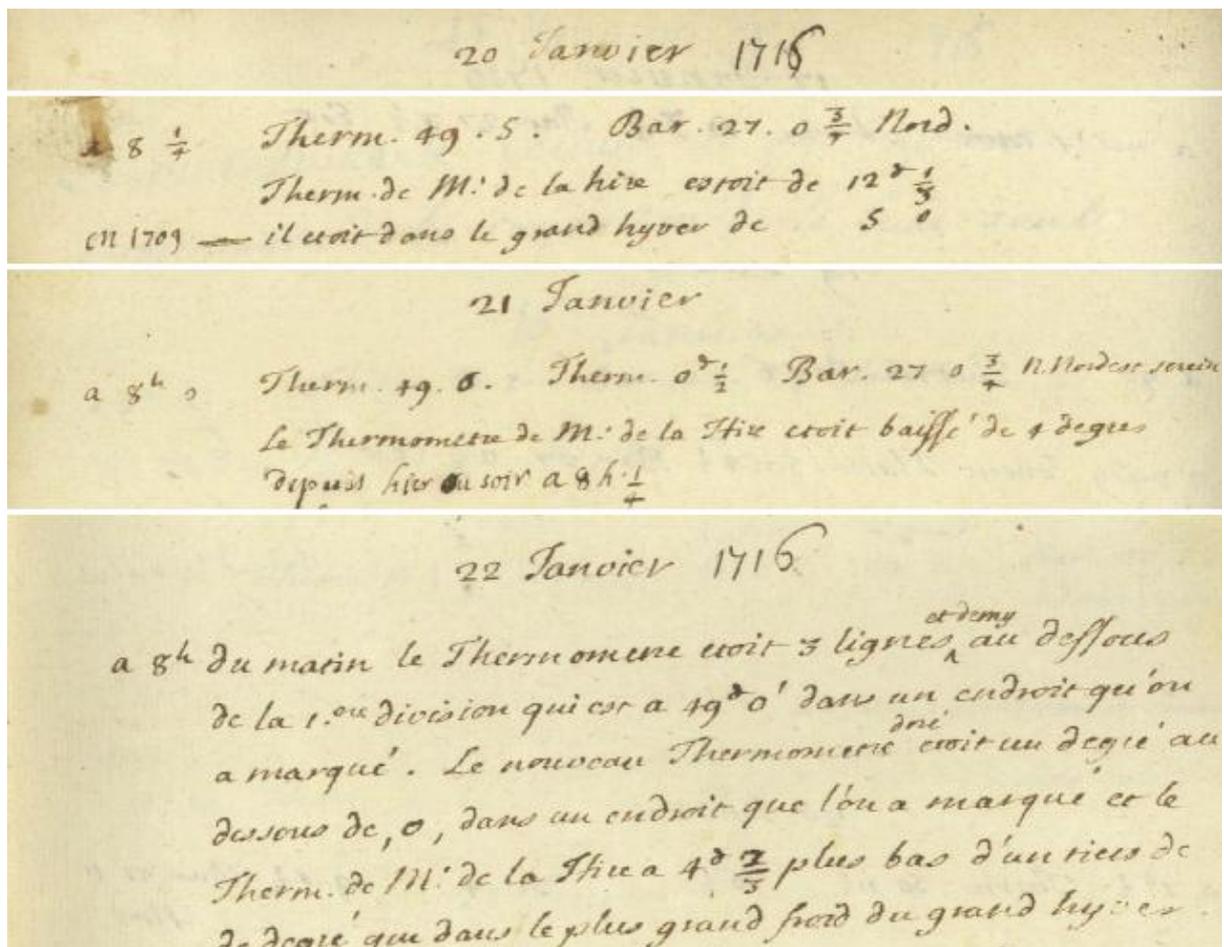


Figure 3 : Extraits des journaux de Cassini indiquant les températures mesurées par La Hire aux mêmes heures (D3/29).

Les températures mesurées par les deux thermomètres sont reportées dans le tableau 1.

	TherLH	Gel 32	Gel 30	Ther3	Gel 52,15	Gel 51,85
20 janvier 7h				50,66	-6,69	-9,77
20 janvier 20h15	12,33	-14,5	-11,6	49,4	-17,9	-13,6
21 janvier 8h	8,33	-17,4	<b>-14,2</b>	49,5	-17,4	<b>-13,2</b>
22 janvier 8h	4,66	<b>-20,1</b>	-16,6	48,7	<b>-22,5</b>	-17,6

Tableau 1 : Températures mesurées par les deux thermomètres durant l'épisode de froid intense de janvier 1716, en degrés des thermomètres de La Hire et de Cassini dans les colonnes correspondantes, et en degrés Celsius dans les colonnes marquées « Gel ».

Les valeurs données par TherLH sont converties en degrés Celsius en utilisant la valeur de 48 degrés dans les caves fréquemment citée par La Hire, et les deux températures de gel extrêmes correspondant à un intervalle de  $31 \pm 1$  degrés. La corrélation montrée sur la figure A2 (cf Annexe 1) entre les températures données par ce thermomètre et celles fournies par un thermomètre de Réaumur montre une excellente linéarité des échelles des deux thermomètres, donc en particulier celui de La Hire. La Hire écrit dans ses comptes rendus publiés dans les volumes de l'Histoire que son thermomètre « marque le commencement de la gelée quand il est à 30 degrés de hauteur » (voir La Hire, 1702, p. 5), cette valeur étant revue à 32 degrés dans les comptes rendus suivants (voir par ex. La Hire, 1704, p. 6). De nombreux auteurs ont commenté cette valeur, sur laquelle tout le monde s'accorde à penser qu'elle est comprise entre 30 et 32 degrés (voir par ex. Swinden, 1778, p. 120), une valeur moyenne de d'ordre de 31 degrés étant à privilégier (Renou, 1876, p. 39). Cette fourchette réalise notamment un bon accord entre la séquence de refroidissement de janvier 1709, telle qu'enregistrée un peu avant le lever du soleil par le thermomètre de La Hire (La Hire, 1710), et celle tirée de la série des températures minimales diurnes de Louis Morin (Legrand et Le Goff, 1992) (Fig. 4).

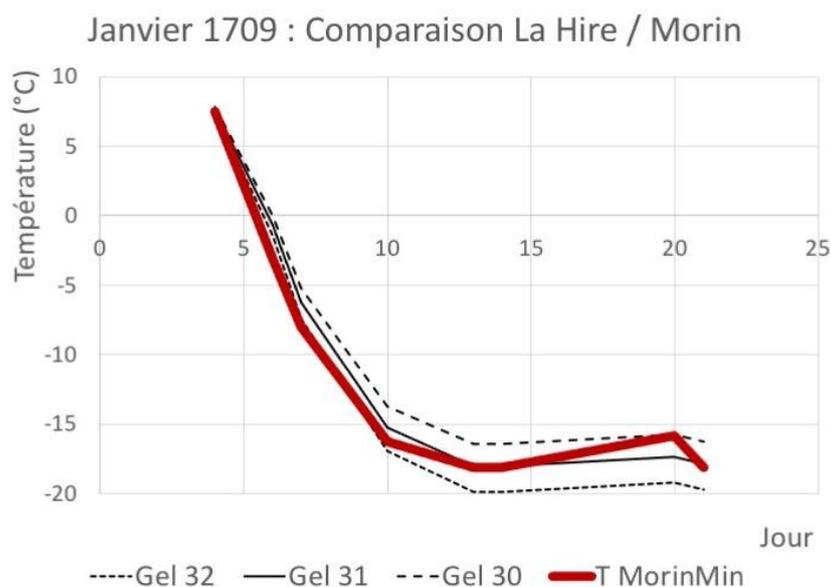


Figure 4 : Comparaison entre les températures fournies par le thermomètre de La Hire pour une température de gel de  $31 \pm 1$  et celles mesurées par Louis Morin durant la période de froid de janvier 1709.

Concernant la période de froid de janvier 1716, on constate, d'après les mesures de Ther3, que la température chute de plus de  $10^{\circ}\text{C}$  durant la journée du 20 janvier, la température mesurée par La Hire ne rejoignant celle mesurée par Cassini II que le lendemain matin (Tableau 1). Cela peut s'expliquer par la localisation du thermomètre de La Hire, que Jean-Dominique Cassini de Thury (Cassini IV) décrit ainsi : « Le thermomètre de La Hire étoit [...] placé dans l'intérieur d'une tour octogone dont les murs ont sept pieds d'épaisseur, et qui, étant découverte, forme une espèce de puits de 24 pieds de diamètre sur environ 40 de profondeur », celui-ci étant par ailleurs « hermétiquement scellé contre le mur » (Cassini de Thury, 1797, p. 359 et p. 351). On peut soupçonner une inertie thermique de l'environnement du thermomètre de La Hire (l'air dans le puits formé par la tour non couverte, le mur sur lequel il est fixé) retardant la chute de température par rapport aux mesures faites par Cassini II au premier étage de la même tour, mais à une fenêtre donnant au nord directement sur l'extérieur. En cohérence avec cette explication, les températures mesurées par La Hire et Cassini se rejoignent le 21 janvier au matin, après une nuit de froid intense. Nous avons choisi, dans le tableau 1, la fourchette sur la valeur de la température de gel de Ther3 ( $52 \pm 0,15$ ) en sorte que les valeurs minimale et maximale restituées entre le 21 et le 22 janvier, resp.  $-22,5^{\circ}\text{C}$  et  $-13,2^{\circ}\text{C}$ , encadrent strictement leurs homologues sur TherLH, resp.  $-20,1^{\circ}\text{C}$  et  $-14,2^{\circ}\text{C}$ . De cette estimation découle, à travers la corrélation montrée sur la figure 2, la température de gel de Ther2 :  $22 \pm 3$  degrés.

En guise de vérification de la cohérence de notre valeur de la température de gel de Ther2, nous avons reporté dans le tableau 2 une série de mesures de la température accompagnée de commentaires sur la neige et le gel réalisée durant les mois de janvier et de février 1695 (D3/14), auquel nous avons joint deux observations ponctuelles de mars 1682 (D1/8) et janvier 1688 (D3/7). Les fourchettes de températures en degrés Celsius sont obtenues en utilisant comme températures de référence  $55 \pm 0,5$  (caves) et  $22 \pm 3$  (gel). On observe une bonne cohérence d'ensemble entre les températures et les épisodes de chute/fonte de neige, et de gel/dégel. La fonte de la neige le 11 février, alors que la température est inférieure à  $-1^{\circ}\text{C}$ , peut être due au fait qu'elle se produit sur des toits ou des terrasses chauffées par le flux de chaleur en provenance de l'intérieur des bâtiments.

Jour janvier 1695	Température et commentaires dans le journal	$T (^{\circ}\text{C})$	Jour février 1695	Température et commentaires dans le journal	$T (^{\circ}\text{C})$
4	8h Ther 18 Couvert nord à 4h ½ il neige	$[-3,0]$	1	Nord Ther 17 Nubileux il neige encore un peu	$[-3,-1]$
9	Couvert sud ouest il degele 10 h le vent est cessé et il neige Ther 22 ½	$[-1,1]$	6	a midy Ther 7 a 3h il neige	$[-7,-4]$
12	midy il neige est 9h Ther 13 il neige encore et il a neige depuis midy	$[-5,-2]$	7	8h Ther 10 ½ Couvert tranquille il neige	$[-6,-3]$
13	Couvert avec pluie sud est Ther 19	$[-5,-2]$	10	A midy Couvert Ther 10 ½ a 2h il neige	$[-6,-3]$
15	Ther18 6h [soir] un peu de neige 10h ½ Ther 21½ il pleut	$[-3,0]$ $[-1,1]$	11	Midy Ther 16 Couvert La neige fond. 9h ½ Ther 16	$[-4,-1]$ $[-4,-1]$
20	7h Couvert 10h Ther 23 ½ il neige nord ouest	$[-1,1]$	12	7h ½ Ther 16,5 il degele Midy Couvert Ther 18 Nord ouest il dégèle	$[-3,-1]$ $[-3,0]$
26	8h Ther 18 a midy couvert à 2h il neige	$[-3,0]$	13	a midy Ther 19 Couvert ouest Le degel continue minuit Ther 20 Grande humidité	$[-2,0]$ $[-2,0]$
29	8h Ther 15 Couvert nord il neige 10h Ther17 il neige	$[-4,-1]$ $[-3,-1]$	20	8h Ther 23 ½ Couvert tranquille a midy de mesme grand humidité a 3 il pleut 10h Ther 25 il pleut encor	$[-1,1]$ $[0,2]$
30	8h Ther18 Il neige tranquille 10h Ther 17 La neige continue nord	$[-3,0]$ $[-3,-1]$	9 mars 1682	Niege Ther 32	$[3,4]$
31	Midy Ther 18 La neige continue plus fort	$[-3,0]$	2 janvier 1688	a 9 34 du soir Th : 31 la nuit suivante il niege	$[2,4]$

Tableau 2 : Contenus du journal relatifs à la température et à des épisodes de chute/fonte de neige et de gel/dégel durant les deux premiers mois de l'année 1695, et à deux dates particulières en mars 1682 et janvier 1688. Nous avons retranscrit à la lettre les annotations du journal, qui comportent des fautes dans certains cas.

La cohérence de la valeur de la température de gel de Ther3 peut être examinée à travers la séquence de grand froid de janvier-février 1709, déjà utilisée pour confirmer la valeur de  $31 \pm 1$  de la température de gel de TherLH (cf Figure 4). L'évolution complète de la température mesurée par Ther3 (D3/26), en retenant comme températures de référence  $52 \pm 0,15$  (gel) et  $53,95 \pm 0,05$  (caves), est donnée sur la figure 5, comparée aux valeurs  $T_{max}$  et  $T_{min}$  de Louis Morin (Legrand et Le Goff, 1992). On s'attend à ce que les mesures de Cassini, réalisées à midi, se trouvent vers le sommet de la fourchette indiquée par les mesures de Morin, et c'est globalement bien le cas, même si des différences significatives sont constatées certains jours.

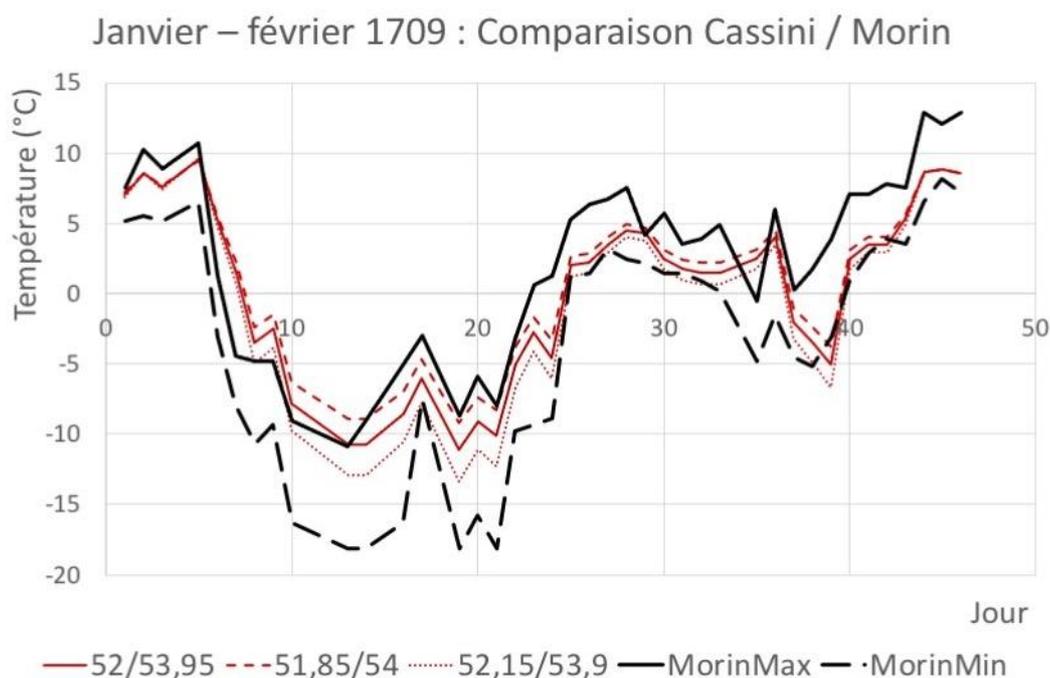


Figure 5 : Évolution de la température durant l'épisode de grand froid de janvier-février 1709 selon Cassini (D3/26) et selon Morin (Legrand et Le Goff, 1992).

### Températures de référence et précision induite sur les mesures

Le tableau 3 récapitule les informations sur les différents thermomètres. Les températures de référence de Ther1 ont été estimées par corrélation avec les températures de Morin, montrant un système de graduations très différent de celui utilisé par Hubin.

Période	Thermomètres/ Températures Cave et Gel	Type	Implantation physique	Modes de détermination des températures de référence	Remarques
1671- 1673 <sup>(1)</sup>	Ther1 Caves : $95,5 \pm 2$ Gel : $64 \pm 1,5$	?	Fenêtre nord 1 <sup>er</sup> étage Tour orientale	Corrélation Cassini / Morin	Données lacunaires, avec de longs intervalles de plusieurs mois sans mesures
1699 - [1754- 1776] <sup>(2)</sup>	TherLH Caves : 48 Gel : $30 \pm 1$	Hubin	2 <sup>ème</sup> étage Tour orientale non couverte (scellé dans le mur en 1694)	Mesures dans les caves, mention du niveau de gel dans les comptes rendus des volumes de l'Histoire, comparaison La Hire/ Morin par les grands froids de janvier 1709	Une mesure au lever du soleil, et quelquefois une autre l'après-midi
1683 – 1705 <sup>(3)</sup>	Ther2 Caves : $55 \pm 0,5$ Gel : $22 \pm 3$	Hubin	Fenêtre nord 1 <sup>er</sup> étage Tour orientale	Mesures dans les caves, Comparaison La Hire / Cassini par les grands froids de janvier 1716	Plusieurs mesures par jour, le plus souvent deux à trois, jusqu'en 1701, ensuite le plus souvent une mesure unique à midi
1704 – 1731 <sup>(4)</sup>	Ther3 Caves : $53,95 \pm 0,05$ Gel : $52 \pm 0,15$	Amontons	Fenêtre nord 1 <sup>er</sup> étage Tour orientale	Températures déduites de la corrélation Ther2/Ther3 sur 1704- 1705	Le plus souvent une mesure unique à midi

(1) Mesures quotidiennes dans D1/1 (septembre 1671 – janvier 1672), plus lacunaires dans D1/2-5 (Février 1672 – juillet 1673).

(2) Les journaux ont été perdus. Les quantités précipitées mensuelles et quelques valeurs extrêmes de la température et de la pression sont reportées dans les comptes rendus annuels publiés dans les volumes de l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences : en 1700-1717 par Philippe de La Hire, en 1719 par son fils Gabriel Philippe de La Hire, en 1720-1726 par Jacques Philippe Maraldi, en 1727-1743 par son neveu Jean Dominique Maraldi, en 1744-1753 par Jean-Paul Grandjean de Fouchy. Par ailleurs, les mesures quotidiennes effectuées par Jacques Philippe Maraldi entre octobre 1719 et janvier 1725 sont accessibles en ligne dans la bibliothèque numérique de l'Observatoire de Paris (D2/22).

(3) D3/1-22.

(4) D3/22-30, D4/1-5.

Tableau 3 : Caractéristiques des différents thermomètres utilisés par les familles Cassini, La Hire et Maraldi.

L'intérêt majeur de pouvoir disposer de températures de référence fiables est dans la précision qui en découle en termes de températures restituées en degrés Celsius. L'erreur sur les températures restituées est représentée sur la figure 6. Pour une température donnée en degré Celsius, celle-ci est convertie en degrés Cassini en utilisant les températures de référence nominales, à savoir, pour Ther3 (utiliser Ther2 conduirait au même résultat final), 52 deg. pour le gel et 53,95 deg. pour les caves. Concernant l'erreur résultant de l'incertitude sur la température de gel, elle est calculée par conversion inverse de la température en degré Celsius en utilisant

53,95 deg. pour les caves, et les températures extrêmes 51,85 et 52,15 deg. pour le gel, en effectuant la demi-différence entre les deux valeurs trouvées. Pareillement, l'erreur résultant de l'incertitude sur la température des caves est calculée en utilisant 52 deg. pour le gel, et les températures extrêmes 53,9 et 54 deg. pour les caves. L'erreur est inférieure à  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  dans la gamme normale de fluctuation annuelle des températures, et inférieure à  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$ , atteignant son minimum autour de  $10^{\circ}\text{C}$ .

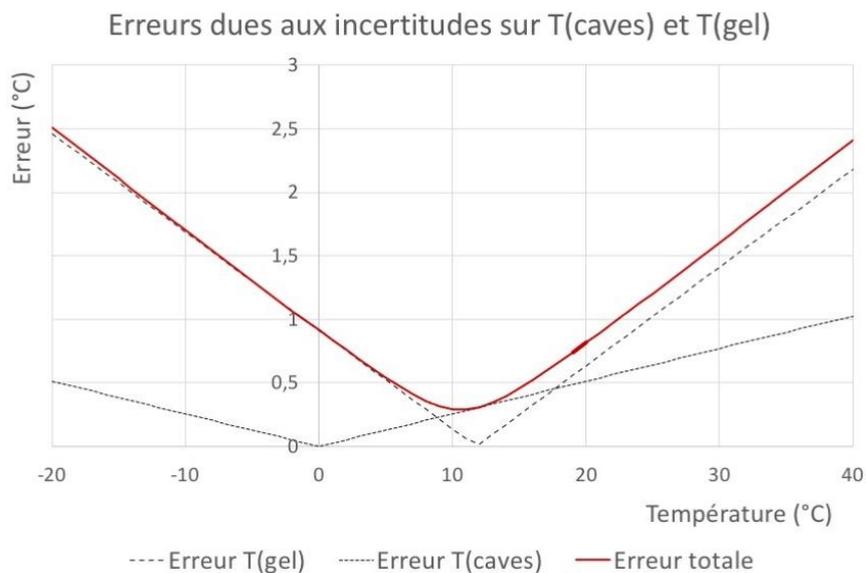


Figure 6 : Erreurs sur la température restituée par les Ther2 et Ther3 de Cassini résultant des incertitudes sur les valeurs des deux températures de référence (caves et gel), et erreur totale obtenue par somme quadratique.

En vue notamment de vérifier cette précision typique de  $\pm 1\text{-}2^{\circ}\text{C}$ , nous avons calculé l'écart, pour l'année 1720, entre la température mesurée à midi par Jacques Cassini avec Ther3 (D4/2), et celle mesurée le matin (vers 6-7h) par Jacques Philippe Maraldi avec le thermomètre utilisé initialement par La Hire jusqu'à sa mort en 1718 (puis son fils, décédé un an après lui) (D2/22). Cet écart est reporté sur la figure 7, où il est comparé à l'écart de température nominal en fonction du mois de l'année (Rousseau, 2013, Fig. 4), montrant un accord très satisfaisant.

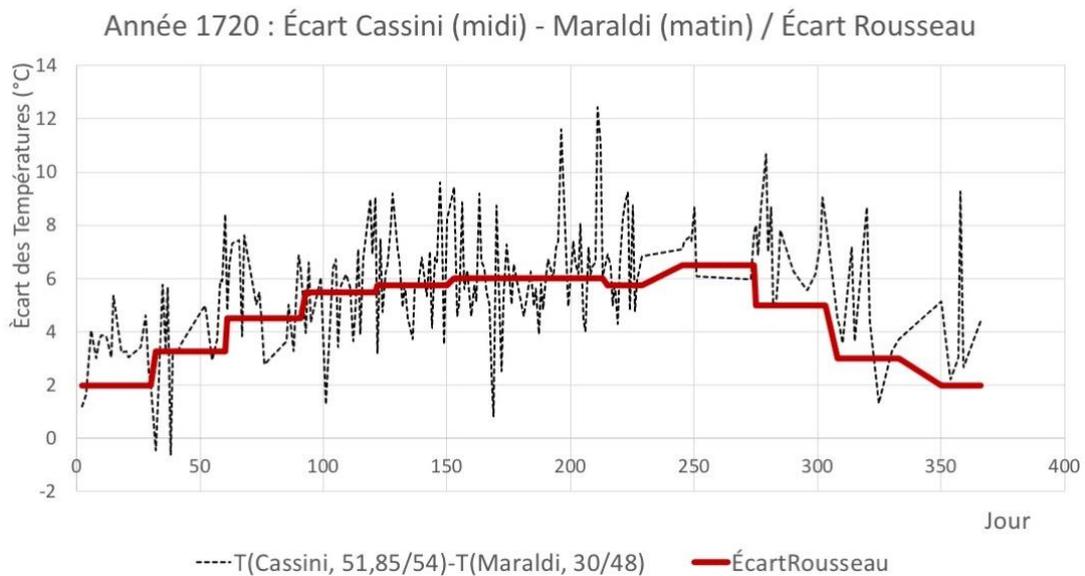


Figure 7 : Amplitude de la variation de la température entre le matin (6h-7h) et le midi à partir des mesures faites par, respectivement, Jacques Cassini (D4/2) et Jacques Philippe Maraldi (D2/22), comparée à la séquence typique fournie par Daniel Rousseau.

### Les données météorologiques fournies par les journaux des astronomes de l'Observatoire : description rapide et résultats préliminaires

La raison d'être des mesures de température et de pression dans les journaux des astronomes de l'Observatoire réside dans la conviction que l'état météorologique de l'atmosphère influe sur la réfraction atmosphérique, qui modifie la hauteur apparente des astres sur l'horizon. La réfraction a été observée au 17<sup>e</sup> siècle varier aux échelles diurnes et saisonnières, sans que les mécanismes à l'origine de ces variations soient précisément compris. Voici, à ce sujet, les recommandations faites par Jean Picard aux futurs astronomes de l'Observatoire de Paris en 1669 quant à la façon de préparer au mieux la prise en compte de la réfraction dans l'interprétation des mesures astronomiques :

Il seroit aussi nécessaire de commencer dès à présent à faire autant qu'il sera possible une table des réfractions exprez pour Paris, suivant les différentes saisons, et mesme suivant les différents changements de temps, marquant en mesme temps les vents et la constitution du Thermomètre pour voir si les changements qui arriveront aux réfractions ne seront point accompagnez de quelque marque certaine. J'ay quantité d'observations des hauteurs du Soleil prises à égale distance devant et apres midy, dont il serait bon de calculer l'heure pour voir la différence qu'il y aura avec l'heure calculée et celle des horloges à pendule mises à costé, ce que j'ay faict pour rectifier les



À partir de la fin de 1701, le nombre de mesures annuelles est divisé par deux, la norme devenant une mesure unique par jour, pour typiquement 85% des jours, et cette mesure étant le plus souvent faite à midi. Le nombre de jours par an comportant deux mesures se réduit progressivement, d'une trentaine au début de la décennie 1700 à une dizaine dix ans plus tard, et zéro en 1720, année pour laquelle on dispose de relevés, faits presque systématiquement à midi, pour un peu de plus de 70% des jours. Un exemple est présenté sur la figure 9 pour la période qui va du 18 au 21 janvier 1720 (D4/2). Toutes les mesures sont faites à midi, et les indications annexes se font très succinctes, portant uniquement sur la direction du vent.

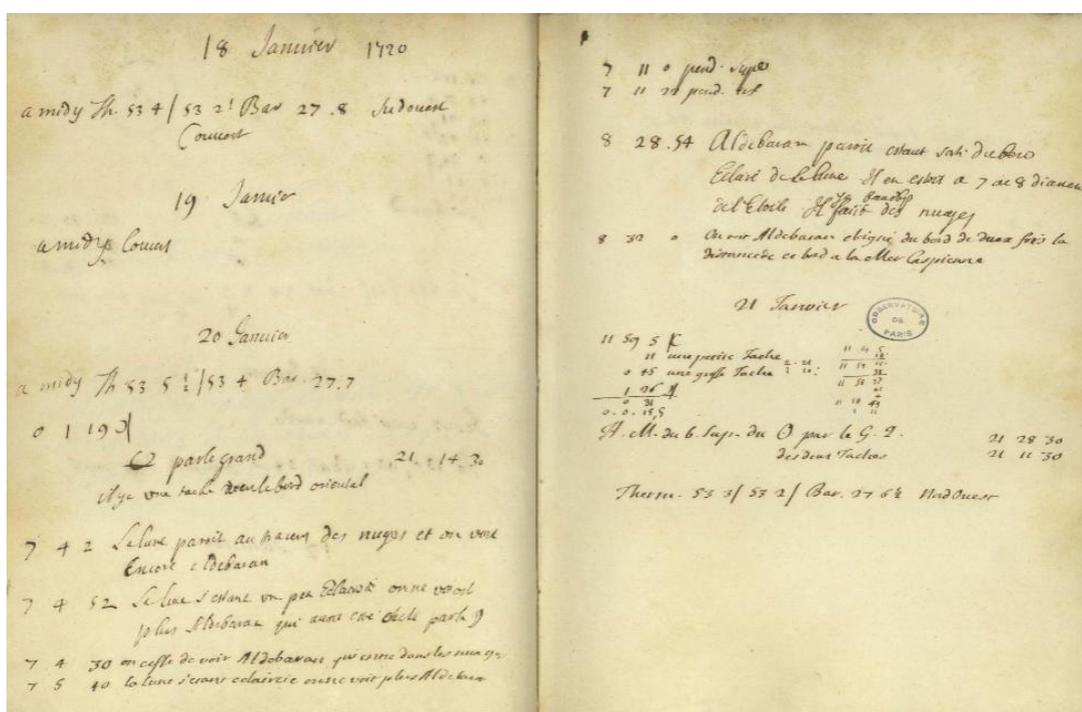


Figure 9 : Extraits du journal correspondant à la période du 18 au 21 janvier 1720 (D4/2).

Sans prétendre fournir une climatologie complète, une exploration préliminaire a cependant été menée. Nous présentons sur la figure 10a l'évolution annuelle de la température mesurée par Cassini en 1694 (D3/13-14), seules les mesures faites à midi ayant été retenues, comparée aux maxima et minima de la température fournis par l'analyse des mesures de Morin (Legrand et Le Goff, 1992). On observe une distorsion significative entre la période hiver-printemps, où la température selon Cassini I est voisine de sa moyenne diurne selon Morin, et la période été-automne, où les valeurs de Cassini I sont, comme attendu puisqu'elles sont prises à midi, proches des valeurs maximales de Morin. La figure 10b, où sont représentées les moyennes mensuelles,

suggère une surestimation de la température, telle que déduite des mesures de Morin, de l'ordre de 2°C entre février et juillet 1684.

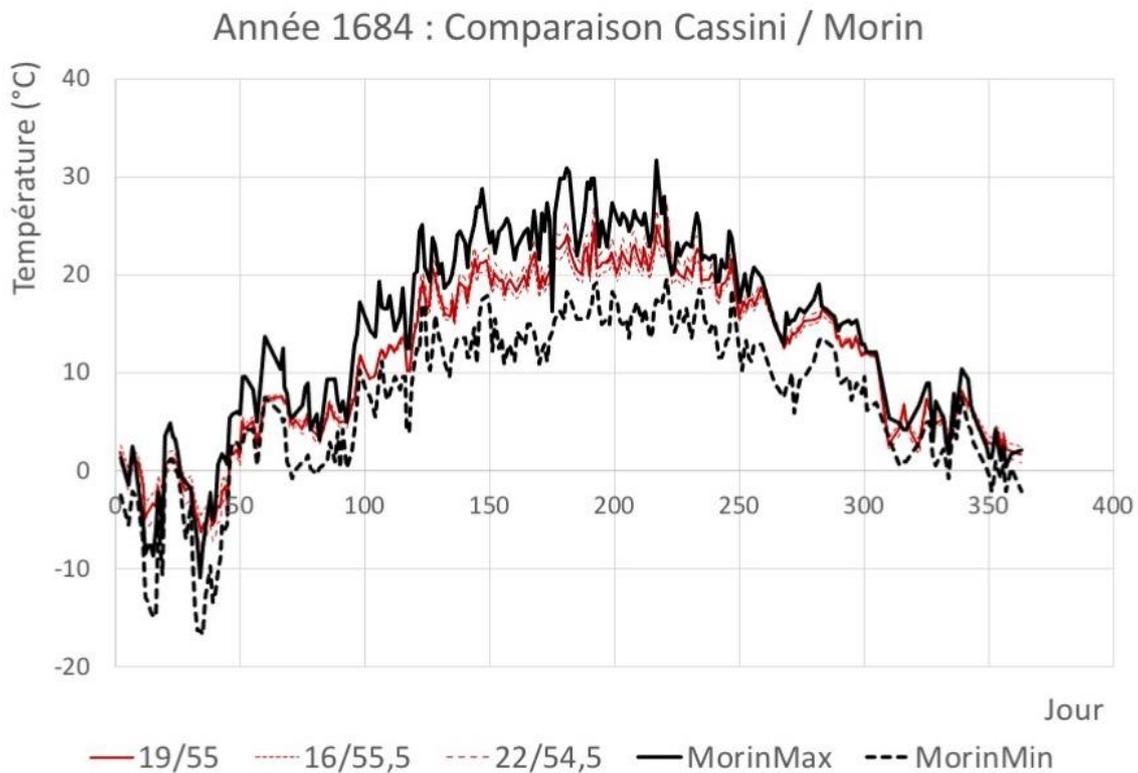


Figure 10a : Évolution de la température mesurée par Cassini (valeurs extrêmes et moyenne, D3/13-14) comparée à celles des maxima et minima fournis par les mesures de Morin.

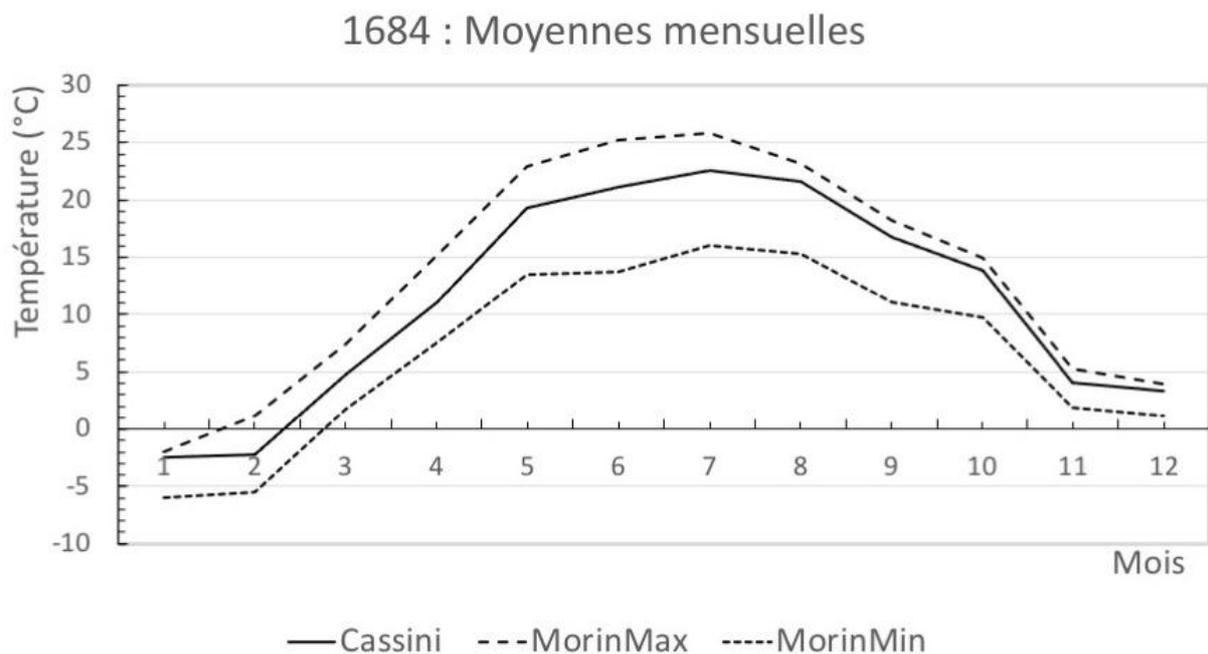


Figure 10b : Moyennes mensuelles des températures représentées sur la figure 10a, en ne conservant que la valeur mensuelle moyenne selon Cassini.

On retrouve le même type d'asymétrie dans la série des températures mesurées simultanément par Ther2 et Ther3 entre l'été 1704 et l'été 1705 (D3/22-23), ainsi que le montre la figure 11.

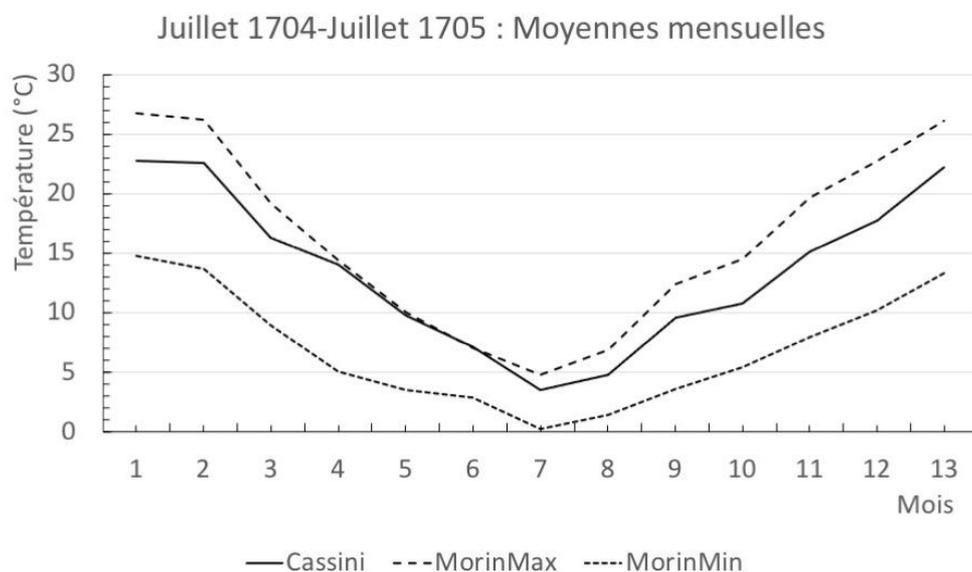


Figure 11 : Moyennes mensuelles des températures mesurées par Cassini et par Morin entre juillet 1704 et août 1705.

Les mesures de Morin s'arrêtent en 1712. Sur la figure 12a, nous montrons l'évolution de la température durant l'année 1716 selon le journal de Cassini II (D3/29-30), en ne retenant que les mesures faites à midi, et la température mensuelle moyenne tirée de la SMMA (Rousseau, 2013), corrigée des écarts entre la température enregistrée à midi et sa moyenne diurne (Rousseau, 2013, Fig. 5). Il convient de remarquer ici que les températures moyennes de la série SMMA ne sont pas calculées pour la période 1713-1732 à partir de mesures réalisées à Paris, mais par une estimation à partir des séries anglaises et néerlandaises (Rousseau, 2009). La figure 12b montre les moyennes mensuelles mesurées par Cassini II, révélant des écarts très significatifs atteignant 3-4°C l'été, et 1-2°C, en sens opposé, au printemps. Ces écarts entre les températures de la SMMA et celles de la climatologie tirée des observations de l'Observatoire peuvent être dus à l'utilisation précédemment mentionnée dans la SMMA de données non-parisiennes à partir de 1713.

### Année 1716 : comparaison Cassini / Rousseau

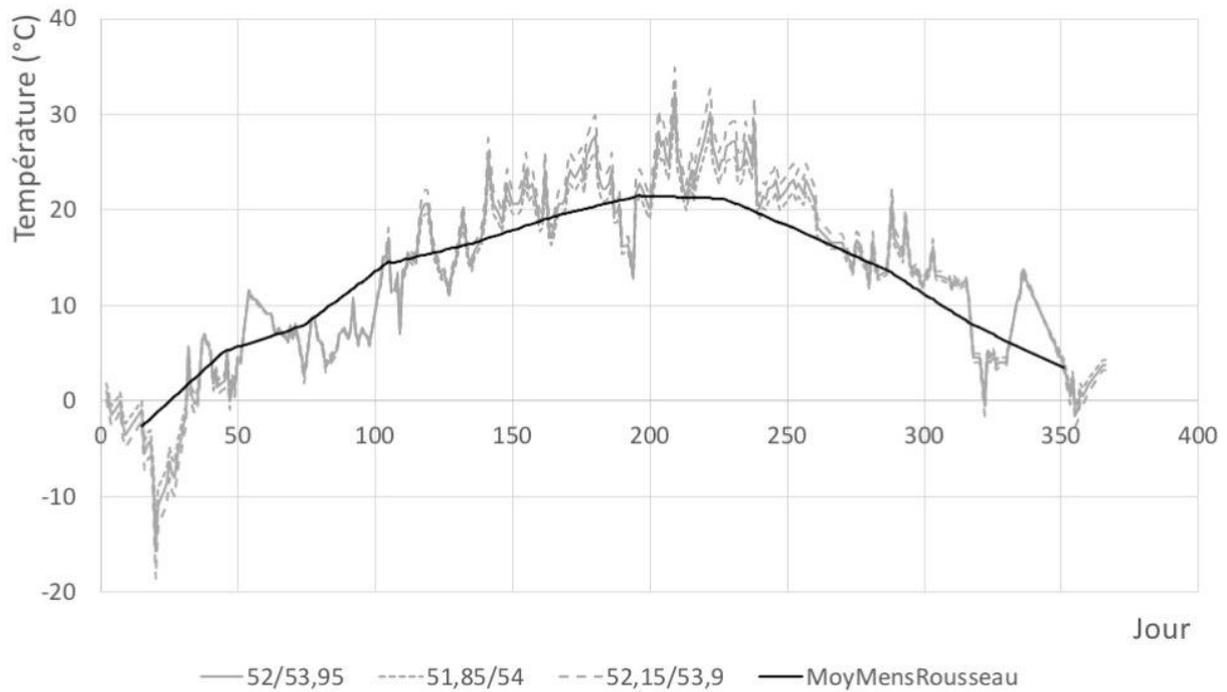


Figure 12a : Évolution de la température mesurée à midi par Cassini (valeurs extrêmes et moyenne, D3/29-30) comparée aux valeurs de la SMMA (Rousseau, 2013), corrigées de l'écart entre température de midi et moyenne diurne (Fig. 5 dans Rousseau).

### Année 1716 : Moyennes mensuelles

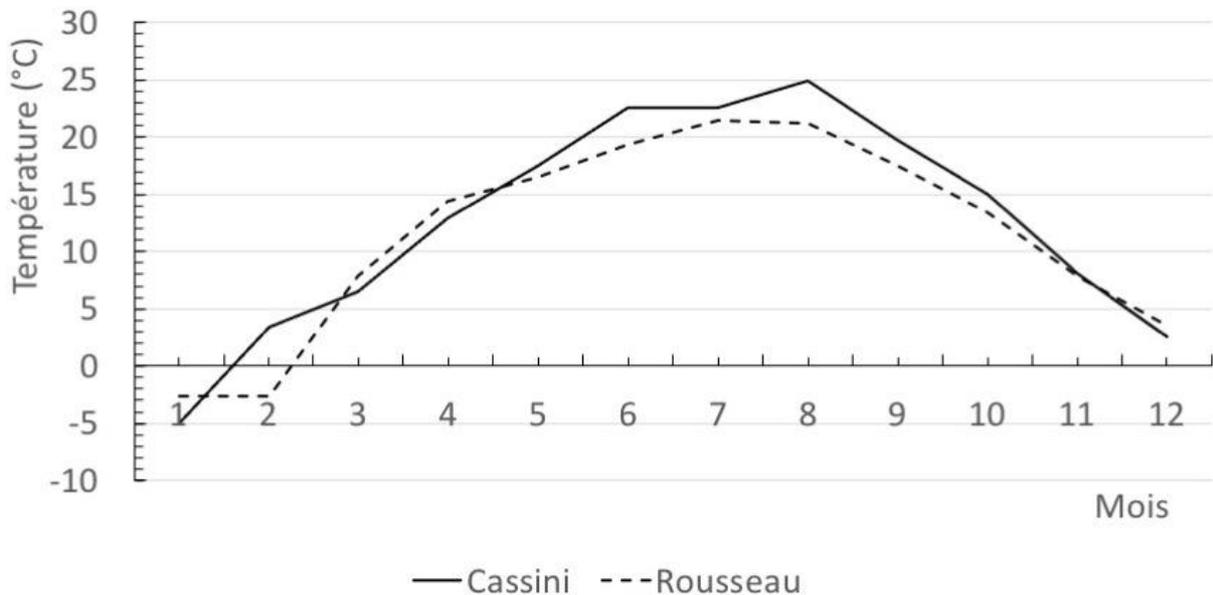


Figure 12b : Moyennes mensuelles des températures représentées sur la figure 10a, en ne conservant que la valeur moyenne selon Cassini.

Les séries de l'année 1720, l'une pour les températures de midi par Cassini, l'autre pour celles du matin par Maraldi, comparées aux moyennes diurnes mensuelles tabulées par Daniel Rousseau, montrent des moyennes diurnes correctement positionnées au printemps, mais manifestement sous-estimées de 2 à 4°C durant l'été et l'automne.

## **Conclusion**

Les explorations préliminaires présentées montrent des écarts de température significatifs, aux structures saisonnières relativement reproductibles d'une année à l'autre, entre les températures déduites des mesures faites par Jean-Dominique Cassini, puis son fils Jacques, et les séries historiques de température actuellement disponibles dans la littérature météorologique relative à cette époque. Les journaux d'observations sur lesquels est basée cette étude sont tous accessibles en ligne, et les thermomètres utilisés sont étalonnés de manière relativement précise ( $\pm 1$  à  $\pm 2$  °C), ces étalonnages étant encore susceptibles d'améliorations. Une analyse complète de la série des données météorologiques de la période 1683-1752, telle que décrite dans cet article, serait de nature à enrichir la climatologie de la période considérée, qui correspond par ailleurs à la sortie du minimum de Maunder. Pour la période 1683-1713 les mesures de l'Observatoire sont complémentaires de celles plus systématiques de Louis Morin et peuvent permettre de détecter d'éventuels biais dans les mesures de Morin. Pour la période 1713-1732 l'apport des mesures de l'Observatoire est essentiel, car ces mesures comblent le chaînon manquant de mesures de température *in situ* à Paris.

**Remerciements** : Nous remercions Christophe Schmit pour l'impulsion donnée au projet d'analyse des journaux d'observations de l'Observatoire de Paris, dont cet article matérialise le volet quantitatif en préparation à une possible exploitation détaillée des données météorologiques qu'ils contiennent. Nous sommes également redevable à l'un des rapporteurs pour ses commentaires constructifs qui ont permis d'améliorer l'article.

## **Annexe 1 : Évolution de la température des caves de l'Observatoire depuis la fin du 17<sup>e</sup> siècle**

François Arago a consacré un chapitre à la température des caves de l'Observatoire (Arago, 1865). Il fournit notamment la valeur de 12,8°C tirée de l'article de 1730 de Réaumur (dont nous avons dit qu'elle doit être ramenée à 11,8°C), mais également des valeurs postérieures, notamment celle, qu'il estime indiscutable, obtenue à partir du thermomètre de Charles Messier placé dans les caves en février 1776 (11,76°C). À partir de 1783, un thermomètre construit par Lavoisier est installé dans les caves par Cassini IV. Néanmoins, en 1817, et à la demande d'Arago, Joseph-Louis Gay-Lussac réalise un thermomètre qui est placé à côté de celui de Lavoisier, montrant que la température est de 11,7°C, inférieure de 0,4°C à celle fournie par le thermomètre de Lavoisier, ce qu'Arago attribue à une dérive temporelle du thermomètre de Lavoisier. Les mesures effectuées par Cassini IV sur le thermomètre de Lavoisier entre août 1783 et février 1785 (Cassini de Thury, 1797) montrent une croissance précoce et surprenante de la température, peut-être liée à la dérive évoquée par Arago, ou bien aux travaux de maçonnerie réalisés en 1782 sur l'avis de Cassini pour isoler au mieux la table où étaient placés les thermomètres, qui ont pu générer un réajustement thermique de l'environnement du thermomètre. En 1852, le thermomètre de Gay-Lussac indique 11,9°C. Au 20<sup>e</sup> siècle, la température des caves augmente, s'élevant régulièrement avec l'urbanisation de 12,5°C en 1922 à 12,9°C en 1943 (Esclangon, 1944). Elle est au début du 21<sup>e</sup> siècle de 14,9°C, cette valeur élevée s'expliquant probablement par l'installation au 20<sup>ème</sup> siècle de tuyaux de chauffage souterrains (Perrier et al., 2005). Arago remarque que la température dans les caves est supérieure de 1°C à la température du sol telle qu'il la mesure, et nous savons aujourd'hui que l'élévation de la température avec la profondeur résulte du flux de chaleur en provenance du manteau terrestre. Le temps caractéristique de diffusion de la chaleur sur une distance égale à la profondeur des caves de l'observatoire ( $\approx 30$  m), en supposant une diffusivité thermique typique de  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (Perrier et al., 2005), est de 30 ans. Nous avons représenté sur la figure A1 la moyenne de la température sur les 30 années précédant une date donnée, ainsi que celle sur seulement 10 années, en utilisant la SMMA (Annexe 1 dans Rousseau, 2013), ainsi que les valeurs les plus indiscutables déduites de l'analyse d'Arago et de la correction par Deluc de la valeur fournie par Réaumur. Nous indiquons également la température brute mesurée à Montsouris (proche de l'Observatoire), influencée par l'îlot de chaleur urbain, moyennée sur 30 ans (cf [https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat\\_de\\_Paris](https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_de_Paris), source : meteo.org). La différence de température entre les caves et la surface double au cours du 20<sup>ème</sup> siècle du fait de l'apparition de sources de chaleur souterraines liées à l'urbanisation.

## Températures des caves et de l'atmosphère

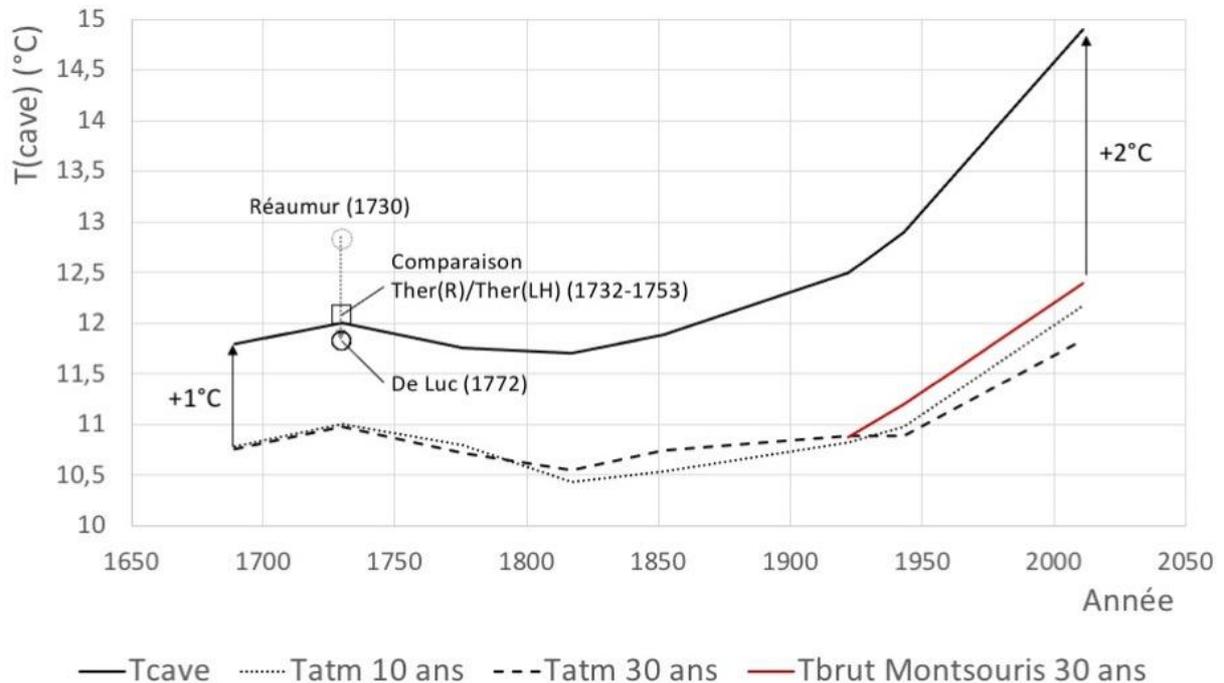


Figure A1 : Températures atmosphériques moyennées sur 30 et 10 ans, incluant la température brute mesurée à Montsouris moyennée sur 30 ans, et température des caves de l'Observatoire.

Les comptes rendus météorologiques annuels publiés dans les volumes de l'Histoire de l'Académie Royale des Sciences entre 1732 et 1753, successivement par Jean-Dominique Maraldi (1732-1743) et Jean-Paul Grandjean de Fouchy (1744-1753), fournissent des extrema annuels des températures lues, d'une part sur le thermomètre initialement utilisé à la fin du 17<sup>e</sup> siècle par La Hire, thermomètre qui se tient à cette époque à 48 degrés dans les caves, d'autre part sur un thermomètre de Réaumur placé à proximité du thermomètre de La Hire, ainsi que des séries mensuelles de minima et de maxima sur l'année 1743, thermomètre installé en 1732 qui se tient dans les caves à 10  $\frac{1}{4}$  au-dessus de 1000 (Réaumur, 1730, p. 503). On sait que le thermomètre de La Hire fut scellé dans le mur du deuxième étage de la tour orientale de l'Observatoire en 1694, et les tests de ce thermomètre dans les caves sont nécessairement antérieurs à cette date (Cassini de Thury, 1797, p. 351). Il est possible, par une simple corrélation (Fig. A2), de déterminer la relation entre degrés La Hire et degrés Réaumur.

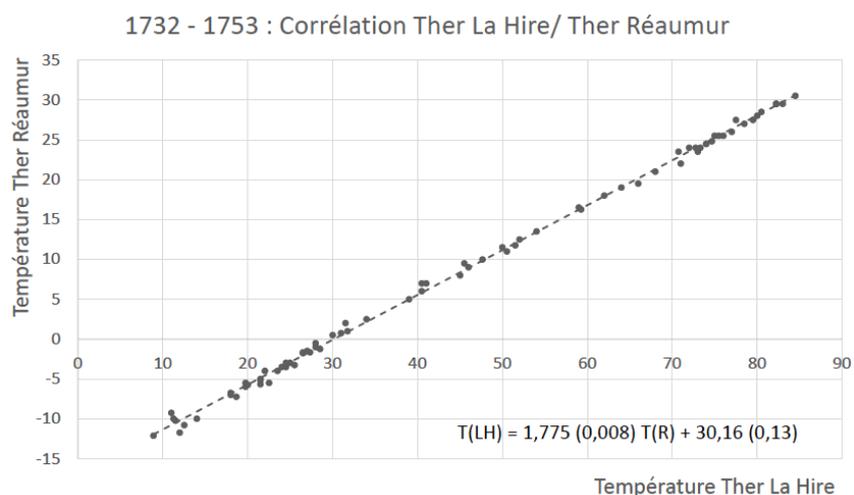


Figure A2 : Corrélation entre les mesures effectuées sur le thermomètre utilisé initialement par La Hire et celles faites sur le thermomètre de Réaumur.

À partir de la relation indiquée sur la figure A2, on trouve que le degré  $10^{1/4}$  de Réaumur correspond au degré  $48,35 \pm 0,08$  de La Hire, ce qui suggère une légère augmentation ( $+0,35 \pm 0,08$  degré La Hire) de la température de la cave, qui convertie en degré Celsius vaut  $+0,25 \pm 0,05^\circ\text{C}$ , depuis la fin du 17<sup>e</sup> siècle, cohérente avec l'augmentation de la valeur lissée sur 10 ans ou 30 ans de la température atmosphérique. Nous avons reporté cette valeur sur la figure A1. La faible variabilité, voire une légère augmentation, de la température des caves sur la période considérée est ainsi avérée. Nous avons retenu pour cette étude préliminaire une température des caves sur la période 1683-1732 de  $11,8^\circ\text{C}$ , invariable avec le temps par souci de simplicité.

## Bibliographie

- D'Alencé J., 1688. *Traitez des Baromètres, Thermomètres et Notiomètres, ou Hygromètres*, Henry Wetstein, Amsterdam.
- Amontons G., 1703. Le thermomètre réduit à une mesure fixe & certaine, & le moyen d'y rapporter les observations faites avec les anciens thermomètres, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 1703 (1705), 50-56.
- Arago F., 1865. Chapitre XLI, Température des caves de l'Observatoire de Paris, in : *Œuvres de François Arago, Deuxième édition, Tome cinquième*, Théodore Morgand, Paris, 636-646.
- Bibliothèque numérique de l'Observatoire de Paris. Disponible à l'adresse : <https://bibnum.obspm.fr/>.
- Cassini de Thury J.-D., 1797. Recherches sur les plus grandes chaleurs qui ont eu lieu à Paris depuis 1682 jusqu'en 1794, In : *Mémoires de l'Institut Nationale des Sciences et des Arts, Sciences mathématiques et physiques, Tome quatrième*, Baudoin, Paris, 338-362.
- Deluc L., 1772. *Recherches sur les modifications de l'atmosphère, Tome premier*, Genève.
- Esclangon E., 1944. Sur les variations de la température des caves de l'Observatoire de Paris, et leur relation éventuelle avec celles de la chaleur interne du globe, *Ciel et Terre*, 60, 99-101.
- La Hire Ph. de, 1701. Observations sur l'Eau de pluie qui est tombée à l'Observatoire Royal pendant toute l'année 1700, avec quelques remarques sur le Thermometre & sur le Barometre, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, (1704), 9-11.
- La Hire Ph. de, 1702. Observations sur la quantité de pluie qui est tombée à l'Observatoire Royal pendant l'année 1701, avec quelques remarques sur le Thermometre & sur le Barometre, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, (1704), 3-7.
- La Hire Ph. de, 1704. Observations de la quantité d'eau de pluie qui est tombée à l'Observatoire Royal, avec les hauteurs du Thermometre & du Barometre pendant l'année 1703, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, (1706), 1-6,
- La Hire Ph. de, 1710. Observations de la quantité d'eau qui est tombée à l'Observatoire pendant l'année 1709, avec l'état du Thermometre et du Barometre, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, (1712), 9-11.
- Lavoisier A., 1776. Extrait des observations qui doivent être lues à la rentrée prochaine de l'Académie Royale des Sciences sur le froid de 1776 et sur sa comparaison avec celui de 1709. In : *Œuvres de Lavoisier, Tome III*, Imprimerie impériale, Paris, 352-426.
- Legrand J-P. et Le Goff M., 1992. Les observations météorologiques de Louis Morin, *Monographie n°6*, volume 2, Direction de la Météorologie Nationale.

- Mariotte E., 1740. Discours du chaud et du froid. In : *Œuvres de Mariotte de l'Académie Royale des Sciences ; nouvelle édition, Tome premier*. Jean Neaulme, La Haye, 184-194.
- Martine G., 1751. *Essais sur la construction et comparaison des thermometres*. Durand, Pissot, Paris.
- Perrier F., Le Mouël J.-P., Poirier J.-P. et Shnirman M. G., 2005. Long-term climate change and surface versus underground temperature measurements in Paris, *Int. J. Climatol.*, 25, 1619-1631.
- Procès-verbaux. Académie royale des sciences, T6 (3 avril – 18 décembre 1669, Registre de physique). Disponible à l'adresse <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k556821?rk=1824043;2#>
- Réaumur R.-A. Ferchaud, 1730. Regles pour construire des thermomètres dont les degrés soient comparables, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, 1730 (1732), 452-507.
- Renou É., 1876. Histoire du thermomètre, In : *Annuaire de la Société Météorologique de France, Tome vingt-quatrième*, Gauthier Villars, Savy, Paris, 19-72.
- Rousseau D., 2009. Les températures mensuelles en région parisienne de 1676 à 2008, *La Météorologie*, 8<sup>e</sup> série, 67, 43-55.
- Rousseau D., 2013. Les moyennes mensuelles de températures à Paris de 1658 à 1675. D'Ismaël Boulliau à Louis Morin, *La météorologie*, 81, 11-22.
- Rousseau D., 2019. Le cahier d'observations météorologiques de Réaumur. Ses mesures de températures de 1732 à 1757, *La météorologie*, 105, 21-28.
- Site [notre-planete.info](http://notre-planete.info). Disponible à l'adresse [https://www.notre-planete.info/terre/climatologie\\_meteo/changement-climatique-France.php](https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/changement-climatique-France.php).
- Swinden J. H., 1778. *Dissertation sur la comparaison des thermomètres*, Marc-Michel Rey, Amsterdam.