

LA MESURE DE LA TEMPÉRATURE

Des premiers thermoscopes à l'échelle de température absolue

Jonathan Freundlich

La Thermodynamique est née au *XIX^{ième}* siècle, après l'invention de la machine à vapeur (James Watt, vers 1770). Il s'agit au départ de comprendre les échanges de chaleur et les machines thermiques, mais elle devient rapidement la science des grands systèmes en équilibre. Ainsi, sa tâche revient à décrire le comportement de systèmes physiques, aussi complexes soient-ils, à l'aide de concepts ayant trait au comportement global du système. L'état d'un système thermodynamique en thermodynamique classique n'est pas défini en spécifiant la dynamique des particules qui le constituent, mais par des concepts opérationnels comme la pression, le volume, la température, la constitution chimique, la viscosité, la densité, l'intensité du champ magnétique, la tension de surface, la force électromotrice, la conductivité électrique,... Dans un système en équilibre, c'est-à-dire qui ne changera pas d'état de lui-même, ces quantités sont indépendantes du temps. C'est à partir de celles-ci que l'on peut ensuite définir d'autres grandeurs, souvent plus générales et plus utiles, comme l'énergie, l'entropie ou l'enthalpie.

Parmi toutes ces grandeurs, la température est d'une importance capitale. L'origine de ce concept est dans nos sensations : un corps nous paraît, au toucher, froid, tiède, ou chaud, avec éventuellement différentes nuances dans ces qualifications. Des changements dans l'état physique des corps accompagnent les modifications de ces sensations. Nous observons des changements d'état : l'eau se transforme en glace en hiver, l'eau mise à chauffer sur un foyer entre en ébullition et se vaporise, les métaux chauffés fondent. Nous observons aussi des variations continues de la taille des corps qui s'échauffent : ceux-ci se dilatent. Lorsque nous mettons en contact un corps chaud et un corps froid, nous constatons (par le toucher) que le corps chaud se refroidit et que le corps froid s'échauffe.

Dans la suite de ce travail, nous essayerons de rendre compte de l'évolution historique du concept de température et de sa mesure, en nous appuyant en partie sur l'ouvrage d'Hasok Chang, *Inventing Temperature : Measurement and Scientific Progress* (Oxford Studies in Philosophy of Science, 2004). La mesure de la température fut au début essentiellement qualitative, avec l'usage de *thermoscopes*, puis on rechercha une plus grande cohérence des systèmes de mesures en établissant des échelles de température standardisées pour les *thermomètres*, pour enfin fixer une *échelle de température absolue*.

Table des matières

1	De la sensation corporelle à la mesure aux premières mesures qualitatives	4
1.1	Une approche physiologique de la température	4
1.2	Les thermoscopes	5
1.3	Des problèmes de définition	7
2	Les débuts de la thermométrie	9
2.1	Le problème des points fixes	9
2.2	Comparaison des différents types de thermomètres	13
2.3	Aller au-delà des points fixes	17
3	L'échelle absolue de température	21
3.1	La compréhension théorique de la température	21
3.2	L'expansion des gaz	23
3.3	Théorème de Carnot et température Kelvin	25

Chapitre 1

De la sensation corporelle à la mesure aux premières mesures qualitatives

1.1 Une approche physiologique de la température

La notion de température est issue d'une sensation corporelle qui trouve un nom très tôt dans l'histoire de l'homme. Jusqu'au *XIX^{ième}* siècle et les travaux du physicien britannique Joseph Black (1728-1799), les notions de température et de chaleur étaient confondues. La notion de froid pouvant être initialement associée à la proximité de la glace, celle de chaleur à la proximité d'un feu, l'apparition de sensations similaires indépendamment de l'environnement extérieur, comme la fièvre, accrurent l'intérêt pour ces notions et il n'est pas étonnant que la question de la chaleur fut initialement associée aux problèmes corporels ou à la médecine.

En effet, le mot température en français vient du latin *temperamentum*, signifiant entre autres la manière d'être, le tempérament. La théorie des humeurs diffusée par Hippocrate, l'une des bases de la médecine antique, imagine que la santé est fonction de l'équilibre des quatre humeurs dans le corps : le sang, le flegme (la lymphe), la bile jaune et la bile noire. Ces humeurs correspondent aux quatre éléments : le feu, l'air, la terre et l'eau, et ceux-ci ont chacun une qualité propre : chaud, sec, froid et humide. Les proportions de ces humeurs déterminent les quatre tempéraments fondamentaux : bilieux (chaud et sec), atrabilaire (froid et sec), flegmatique (froid et humide) et sanguin (chaud et humide).

Néanmoins, cette conception n'est pas spécifique à la médecine : chez Aristote (384-322 avant notre ère), qui reprend une tradition venant d'Empédocle (*VI^{ième}* siècle avant notre ère), les quatre qualités que sont le chaud, le sec, le froid et l'humide, sont comme quatre points cardinaux qui marquent le monde physique. Il n'y a alors pas spécialement de graduation explicite des différents degrés de chaud ou de froid, qui apparaissent peut être avec le médecin grec Galien (131-201 de notre ère), qui reprend les travaux de ses prédécesseurs. Celui-ci introduit quatre degrés (*gradus* en latin) de chaud et quatre degrés de froid, qui ne sont pas appliqués aux objets au sens ou nous l'entendons aujourd'hui, mais qui sont surtout appliqués aux remèdes médicaux qui avaient comme effet de réchauffer ou de refroidir le patient. Galien introduit aussi une température neutre à laquelle correspond le degré zéro de son échelle, et qui correspondait à l'état thermique « normal » d'un individu. Pour lui, cette température normale variait avec la latitude, étant plus haute près de l'équateur, ce qui permettait d'adapter les remèdes nécessaires à produire la bonne quantité de chaleur ou de froid suivant la zone de la Terre où on se trouvait.

Par la suite, le philosophe et physicien arabe Al-Kindi (801-873) donne à différents remèdes des degrés de froid ou de chaud, tout en tenant compte de la quantité de remède administrée : dans les prescriptions, la dose à administrer est calculée en multipliant l'*intensité*, mesurée en degrés, par la masse du médicament. Il introduit

donc une grandeur extensive en regard de la grandeur intensive qu'est la chaleur pour lui, ce qui est à rapprocher de l'association systématique de ces deux types de grandeurs en thermodynamique.

Le nombre de degrés associé à la température (ou à la chaleur, toutes deux étant toujours confondues) augmente ensuite tandis que la notion de température commence à faire l'objet d'études physiques, notamment par l'étude des mélanges de liquides à des températures différentes.

Ainsi, deux corps en contact voient en général leurs températures varier, pendant un temps plus ou moins long suivant la nature du contact thermique et la nature des corps, jusqu'à un état d'équilibre thermique. L'expérience montre que deux corps en équilibre thermique avec un troisième sont en équilibre thermique entre eux, et que deux corps en équilibre thermique sont à la même température. Ce principe (« principe zéro de la Thermodynamique » pour Fowler) est nécessaire pour pouvoir mesurer la température d'un milieu : en introduisant un instrument de mesure dans le milieu, si celui-ci est en équilibre thermique avec le milieu, il mesure bien la température du milieu.

1.2 Les thermoscopes

Après avoir reconnu l'existence des différents degrés de chaleur ou de froid, il convenait de pouvoir mesurer ces degrés de chaud ou de froid. D'après Mach et d'autres historiens des sciences, c'est à Galilée (1564-1642) que revient l'invention du premier thermomètre utilisable. La date retenue est parfois celle de son professorat à Padoue entre 1592 et 1598, mais cela pourrait aussi être vers 1602. Il est vraisemblable que c'est en fait au médecin de Padoue Santorio Santorio (1561-1636) que revient l'invention de ce thermoscope, qu'il utilisait vers 1612 pour prendre la température de ses malades (il signale cet instrument dans une publication de 1612 et le décrit en 1630). C'est l'observation de la dilatation des corps avec la température qui fournit un moyen de mesure de la température : l'instrument consiste en un bulbe attaché à un tube long et étroit immergé dans de l'eau colorée ou de l'alcool.



FIG. 1.1 – Thermoscope à air de Galilée

Lorsque le bulbe est réchauffé (en apposant sa main dessus, par exemple), l'expansion de l'air dans le bulbe fait que la hauteur de liquide dans le tube diminue ou que des bulles d'air apparaissent à la surface du liquide dans le récipient qui le contient. Lorsque la main est retirée et que le bulbe se refroidit, le liquide monte dans le tube. Lorsque le bulbe est placé dans différents environnements thermiques, la position du ménisque donne une

indication sur les « degrés de chaud et de froid ». Santorio Santorio introduisait ainsi la petite boule de verre dans la bouche du patient fiévreux ou la lui faisait tenir dans le creux de la main, puis notait le déplacement de la colonne d'eau. Nous utilisons le mot *thermoscope* car il n'y avait souvent pas encore d'échelle de température qui permette une quantification de celle-ci : les informations demeurent très qualitatives; nous réserverons le mot *thermomètre* pour les instruments de mesure de la température dotés d'une échelle permettant la quantification. Néanmoins, Santorio Santorio aurait doté son appareil d'une graduation décimale qui comprenait deux repères, l'un obtenu en refroidissant la boule par de la neige, l'autre en chauffant à la flamme d'une bougie, ce qui ferait de son appareil un thermomètre et non un thermoscope.

Si un grand nombre d'historiens des sciences s'accordent pour faire remonter à Galilée l'utilisation du thermoscope, il semble qu'il ne fut pas le premier à utiliser ce procédé pour mesurer la température. Néanmoins, c'est bien après Galilée que l'usage des thermoscopes devient systématique et ce fut En effet, dès le *III^{ème}* siècle avant notre ère, Philon de Byzance, mécanicien grec d'Alexandrie (son nom vient peut être de la diffusion de son oeuvre à Byzance au *X^{ème}* siècle), imagina un appareil permettant de détecter le réchauffement de l'air basé sur le même principe que le thermoscope de Galilée. L'instrument comprend un ballon de plomb rempli d'air et muni d'un bouchon étanche; une des branches d'un tube de verre, en forme de U renversé traverse le bouchon, tandis que son autre branche descend au fond d'un vase plein d'eau. Lorsque l'appareil est exposé au soleil, l'air qui se dilate dans le ballon de plomb provoque l'émission de bulles dans l'eau du vase. Puis, si l'on place l'appareil à l'ombre, l'air se refroidit dans le ballon, et l'eau du vase monte dans le tube de verre pour s'écouler ensuite dans le ballon. Lors d'un nouvel échauffement, l'air dilaté refoule cette eau dans le vase.

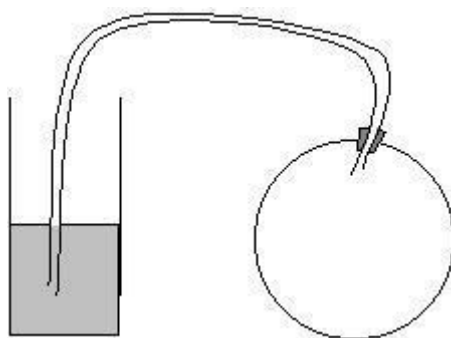


FIG. 1.2 – Thermoscope de Philon de Bizance

Philon décrit cet appareil dans un ouvrage intitulé *Pneumatika*; il déduit de son fonctionnement que le feu est étroitement associé à l'air et que le feu attire l'air, le feu et l'air étant considérés en Grèce Antique comme deux des entités fondamentales constituant le monde.

Au premier siècle avant notre ère, Héron d'Alexandrie, ingénieur et mécanicien grec ayant conçu un grand nombre de machines hydrauliques (notamment un *éolipile*, machine à vapeur constituée d'une sphère fixée sur un axe et équipée de deux tubes coudés sortant de manière opposée : en chauffant l'eau contenue dans la sphère métallique, la vapeur d'eau formée donnait en s'échappant un mouvement de rotation à la sphère), mis au point un instrument proche du thermoscope.



FIG. 1.3 – L'Éolipile d'Héron d'Alexandrie

Le thermoscope d'Héron d'Alexandrie était constitué d'un ballon d'où partaient deux tubes, l'un en haut en forme de U, l'autre en bas, qui se rejoignaient dans une réserve d'eau.

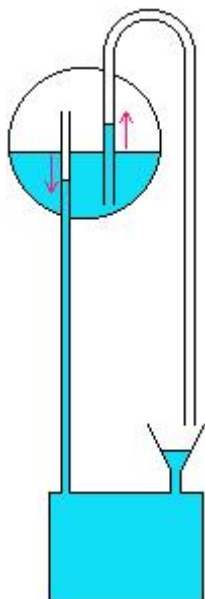


FIG. 1.4 – Le thermoscope d'Héron d'Alexandrie

Après exposition au soleil, l'eau monte dans le tube en U et se déverse dans l'entonnoir. Mis à l'ombre, le thermoscope revient dans son état initial, la quantité d'air restant toujours la même. Pour Héron, la diminution du volume de l'air du ballon placé à l'ombre « était dû à des fuites à travers les pores du ballon ». Si les deux instruments développés par Philon de Byzance et Héron d'Alexandrie étaient bel et bien proches du thermoscope de Galilée, le manque de compréhension des phénomènes mis en jeu ne leur permit peut être pas de se faire connaître, demeurant au rang d'attractions marginales pour leurs contemporains. C'est pourquoi il faut attendre la Renaissance pour voir une reprise de l'expérimentation ; les anciens textes grecs sont redécouverts : en Italie, le médecin Santorio Santorio contribue à la publication latine (Urbino, 1575) puis en Italien (Ferrara, 1589) des *Pneumatiques* de Héron d'Alexandrie. Un instrument construit en Italie est décrit dans la *Récréation mathématique*, publiée en 1624 par un jésuite lorrain, Jean Leurechon (1593-1670), sans doute du type des thermoscopes de Galilée. C'est d'ailleurs dans cet ouvrage qu'apparaît pour la première fois le terme *thermomètre*.

1.3 Des problèmes de définition

À partir du début du *XVII^{ème}* siècle, l'usage des thermoscopes se répand en Europe. On parle de thermoscopes pour les premiers appareils permettant de mesurer la température, comme ils diffèrent des thermomètres actuels, qui procurent une signification systématique des indications observées. Les thermoscopes ne fournissent qu'une échelle de température ordinaire : les nombres n'indiquent qu'un ordre, et ne signifient rien en eux-mêmes. Ainsi, un thermoscope ne mesure aucune quantité numérique et se contente d'indiquer si telle chose est plus chaude qu'une autre et ne nécessite pas de points fixes. Mais d'où vient cette confiance en cet instrument ? En l'absence de théorie sur la dilatation des gaz ou des liquides, rien ne nous permet de dire que cette dilatation dépend exclusivement de la température, et encore moins que la relation entre le volume et la pression est une relation linéaire.

L'assise initiale du thermoscope est la sensation humaine, non quantifiée. Nous avons l'idée que les liquides se dilatent avec la chaleur car c'est ce que nous observons dans certains cas habituels. Ainsi, en posant une main chaude sur un thermoscope, on le voit monter graduellement ; on le plonge dans de la glace et on le voit alors

descendre. On humidifie le thermoscope et on le voit descendre tandis que nous soufflons dessus en se rappelant que l'on a plus froid en se tenant dans le vent après avoir été surpris par la pluie. Ce sont donc les sensations humaines qui servent de première référence aux thermoscopes. La concordance des indications du thermoscope et de nos sensations nous porte à croire en sa fiabilité.

Mais pouvons nous croire en nos sensations ? Si les instruments de mesure de base sont initialement justifiés par leur conformité avec nos sensations, nous leur permettons aussi d'améliorer, voire de corriger les sensations (ce qu'Hasok Chang appelle « Principle of respect » dans *Inventing Temperature*). Ainsi, le respect des sensations est une référence primordiale, mais cela ne signifie pas que le verdict des sensations possède une autorité inconditionnelle. Un exemple permet de mettre en évidence le fait que nos sensations ne sont pas infaillibles : on met une main dans un bac d'eau chaude, l'autre dans un bac d'eau froide. Après un moment, on les met toutes deux dans un même bac d'eau de température intermédiaire ; l'une ressent que l'eau est froide, l'autre qu'elle est chaude. Les thermoscopes confirment néanmoins que la température du dernier bac est bel et bien uniforme.

D'une certaine manière, nous n'avons pas d'autre alternative que de voir en nos sensations une référence première. La relation entre la référence première et une deuxième référence (le thermoscope) n'est pas une simple relation logique : la deuxième référence n'est ni déduite de la première, ni dérivée par induction ou généralisation. Il doit juste y avoir un accord suffisant entre les deux : la deuxième référence doit respecter la première aussi longtemps que c'est possible de le faire, ce qui reste assez vague.

L'usage des thermoscopes est un premier stade ne donnant qu'une information ordinale sur la température des corps étudiés. Il s'agit de la première étape dans le développement de techniques de mesure de plus en plus cohérentes et précises. On peut parler ainsi d'*itération épistémologique* : les connaissances successives se bâtissent chacune sur la précédente et se développent vers un résultat non connu à priori (ce qui diffère cette itération épistémologique d'une itération mathématique).

Le développement de techniques de mesure de la température, associées à une compréhension croissante des phénomènes physiques sous-jacents, s'effectue en différentes étapes : Partant de la sensation corporelle de chaud et de froid, les premiers thermoscopes se développent. La validité de la sensation doit être acceptée au départ, car nous avons pas d'autre moyen de commencer pour obtenir une connaissance empirique. Bâtie sur la corrélation observée entre la sensation corporelle de chaud et de froid et les changements de volume des fluides, une nouvelle référence apparaît : les thermoscopes. Ceux-ci permettent d'améliorer la qualité des observations avec des résultats ordonnés de manière plus solide et une plus grande gamme de phénomènes observables. La cohérence des indications des thermoscopes est un moyen indépendant de valider leur utilisation. A partir de l'usage des thermoscopes, on peut établir certains points fixes à partir de phénomènes qui sont suffisamment constant en température. Avec ces points fixes et la division des intervalles entre ces points fixes, il devient possible de construire une échelle numérique qui devient la prochaine référence. Les thermomètres permettent alors une réelle quantification de la température.

Chapitre 2

Les débuts de la thermométrie

2.1 Le problème des points fixes

Les thermomètres du *XVII^{ième}* siècle

Peu après les premiers thermoscopes, et même parfois concomitamment, des points de repérage furent introduit pour avoir une approche plus quantitative de la chaleur. Certaines difficultés rencontrées trouvèrent des solutions acceptables, comme la dépendance des mesures vis-à-vis des variations de la pression atmosphérique, dont le physicien italien Evangelista Torricelli (1608-1647) donna en 1644 une interprétation correcte. Afin de limiter l'importance de cette dépendance, le grand-duc de Toscane, Ferdinand II de Médicis (1610-1670) fit fabriquer un thermomètre à alcool, constitué d'un tube de verre fermé à une extrémité et terminé à l'autre par un réservoir en forme de boule. Ce modèle de thermomètre est hermétiquement clos et devient célèbre en l'Europe sous le nom de thermomètre florentin. Chaque degré était marqué sur le tube par un point d'émail, blanc pour les dizaines et noir pour le reste ; il pouvait y avoir jusqu'à 300 graduations, d'où la forme spiralée souvent utilisée.

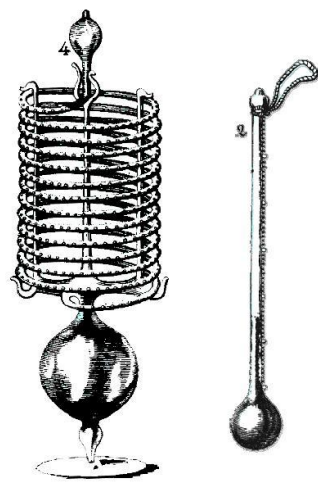


FIG. 2.1 – Deux modèles de thermomètres florentins

Si donc certains s'écartent du thermomètre à air, comme Ferdinand II de Médicis ou le physicien français Jean Rey (1583-1645), qui utilisait de l'eau comme substance thermométrique, d'autres améliorent le thermomètre à air, comme Otto von Guericke (1602-1686) ou Guillaume Amontons (1663-1705).

À la fin du *XVII^{ième}* siècle, les thermomètres étaient d'un usage courant, mais ils n'étaient pas du tout standardisés. Il n'y avait pas de « points fixes » pouvant servir d'étalon : sans points fixes vraisemblables, il n'était pas possible de mettre en place aucune échelle de température cohérente, et sans points fixes partagés par tous les fabricants de thermomètres, il n'y avait pas d'espoir de faire une échelle standardisée. Afin de mettre en place une échelle de température, il suffisait de trouver deux points fixes et d'effectuer une graduation entre eux.

Ainsi, Edmond Halley (1656-1742) recommandait le point d'ébullition de l'alcool (« spirit of wine ») comme point fixe, ayant remarqué que l'alcool dans son thermomètre arrivait toujours au même niveau juste avant de se mettre en ébullition, ainsi que la température d'espaces profondément souterrains, comme les grottes sous l'observatoire de Paris (qu'une expérience de Mariotte aurait montré comme constante au cours de l'année). De leur côté, Robert Hooke et Robert Boyle prenaient comme point fixe inférieur le point de solidification de l'eau en glace. De manière générale, au début du *XVII^{ième}*, il y a profusion de propositions pour les points fixes, sans consensus sur ceux qui seraient les meilleurs.

Person	Year	Fixed points ("and" indicates a two-point system)	Source of information
Sanctorius	c. 1600	candle flame <i>and</i> snow	Bolton 1900, 22
Accademia del Cimento	c. 1640?	most severe winter cold <i>and</i> greatest summer heat	Boyer 1942, 176
Otto Von Guericke	c. 1660?	first night frost	Barnett 1956, 294
Robert Hooke	1663	freezing distilled water	Bolton 1900, 44–45; Birch [1756] 1968, 1:364–365
Robert Boyle	1665?	congealing oil of aniseed <i>or</i> freezing distilled water	Bolton 1900, 43
Christiaan Huygens	1665	boiling water <i>or</i> freezing water	Bolton 1900, 46; Barnett 1956, 293
Honoré Fabri	1669	snow <i>and</i> highest summer heat	Barnett 1956, 295
Francesco Eschinardi	1680	melting ice <i>and</i> boiling water	Middleton 1966, 55
Joachim Dalencé	1688	freezing water <i>and</i> melting butter <i>or</i> ice <i>and</i> deep cellars	Bolton 1900, 51
Edmond Halley	1693	deep caves <i>and</i> boiling spirit	Halley 1693, 655–656
Carlo Renaldini	1694	melting ice <i>and</i> boiling water	Middleton 1966, 55
Isaac Newton	1701	melting snow <i>and</i> blood heat	Newton [1701] 1935, 125, 127
Guillaume Amontons	1702	boiling water	Bolton 1900, 61
Ole Rømer	1702	ice/salt mixture <i>and</i> boiling water	Boyer 1942, 176
Philippe de la Hire	1708	freezing water <i>and</i> Paris Observatory cellars	Middleton 1966, 56
Daniel Gabriel Fahrenheit	c. 1720	ice/water/salt mixture <i>and</i> ice/water mixture <i>and</i> healthy body temperature	Bolton 1900, 70
John Fowler	c. 1727	freezing water <i>and</i> water hottest to be endured by a hand held still	Bolton 1900, 79–80
R. A. F. de Réaumur	c. 1730	freezing water	Bolton 1900, 82
Joseph-Nicolas De l'Isle	1733	boiling water	Middleton 1966, 87–89
Anders Celsius	by 1741	melting ice <i>and</i> boiling water	Beckman 1998
J. B. Micheli du Crest	1741	Paris Observatory cellars <i>and</i> boiling water	Du Crest 1741, 8
<i>Encyclopaedia Britannica</i>	1771	freezing water <i>and</i> congealing wax	<i>Encyclopaedia Britannica</i> , 1st ed., 3:487

FIG. 2.2 – Résumé des points fixes utilisés par différents scientifiques (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Certains propositions semblent assez surprenantes, comme celle de Joachim Dalencé(1640-1707?) de prendre la température de fusion du beurre comme point fixe supérieur, ou d'autres propositions comme la température des étés les plus chauds, voire celle de Charles Piazzi Smith (1819-1817) de prendre la température moyenne de la chambre du roi dans la grande pyramide de Gizeh. On peut aussi remarquer l'utilisation par Isaac Newton de la « température du sang »(la température du corps humain).

Parmi les échelles de température qui se développent durant la première moitié du *XVIII^{ième}* siècle, on peut retenir :

- L'échelle du danois Ole Rømer (1644-1710) en 1702 : un thermomètre à alcool (esprit-de-vin) où la graduation 60 marque la température de l'eau bouillante et la graduation 8 celle de la neige ou de la glace pilée. La graduation 8 pour la neige est choisie telle pour éviter d'avoir des températures négatives, les hivers à Copenhague n'allant pas en dessous du zéro de l'échelle de Rømer.
- L'échelle de l'allemand Gabriel Fahrenheit (1686-1736) en 1717, qui était en relation avec Rømer : Fahrenheit construit le premier thermomètre à mercure, et prit comme références la température de la glace fondante (32 ° F) et celle du sang (96 ° F).
- L'échelle du Français René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757) en 1730 qui avait comme points fixes la glace fondante (0 ° R) et l'eau en ébullition (80 ° R). Ses thermomètres étaient des thermomètres à alcool.
- L'échelle centésimale du physicien suédois Anders Celsius (1701-1744) en 1741 : un thermomètre à mercure ayant comme points fixes la glace fondante (0 ° C) et l'ébullition de l'eau (100 ° C). C'est grâce à la Révolution Française que ce système connaît une large utilisation, comme la Commission des poids et mesures, créée par la Convention, décide en 1794 que « *le degré thermométrique sera la centième partie de la distance entre le terme de la glace et celui de l'eau bouillante* ».

Au milieu du *XVII^{ième}* siècle, un consensus commence à poindre sur le choix des points de fusion et de congélation de l'eau, mais des incertitudes subsistent. Nous allons reprendre certaines études sur le point d'ébullition de l'eau pour rendre compte des difficultés rencontrées lors de l'établissement des points fixes.

Le point d'ébullition de l'eau

En 1776, la Royal Society de Londres nomme un comité de 7 membres pour faire des recommandations sur les points fixes des thermomètres, dirigée par Henry Cavendish (1731-1810). Ce comité considéra comme acquis que ce seraient les deux points de l'eau qui seraient utilisés, mais émit des doutes sur leur stabilité effective. Ils notèrent tout d'abord que les thermomètres existants, même ceux effectués par les « meilleurs artistes », différaient les uns des autres sur les caractéristiques du point d'ébullition, les différences allant jusqu'à 2-3 degrés Fahrenheit.

Plusieurs causes de variation sont identifiées, la première étant la variation avec la pression atmosphérique, d'où la proposition par le comité d'une pression standard de 29,8 pouces anglais (757mm environ) de mercure où devrait être prise la température d'ébullition. Des formules sont aussi données (grâce au travail du français Jean-André De Luc (1727-1817)) pour ajuster la température du point d'ébullition au cas où la pression n'aurait pas été la pression recommandée. Le fait que le mercure dans le tube n'est pas forcément à la même température que celui dans le bulbe est un autre problème qui peut être résolu en immergeant totalement la colonne de mercure dans l'eau bouillante.

Si les deux problèmes évoqués semblent résolus, il persiste le problème de la compréhension de la nature de l'ébullition, et notamment de la caractérisation des différents stades de l'ébullition. Ainsi, un thermomètre des années 1750 fabriqué par George Adams le Vieux possède 2 points d'ébullition : l'un à 204 ° F « water begins to boyle » et l'autre à 212 ° F « water boyles vehemently », qui correspondent à différents « degrés d'ébullition ».

Jean-André De Luc, géologue, météorologiste et physicien ayant des intérêts dans des domaines aussi variés que les sciences, le commerce, la politique, et la religion publie en 1772 son principal ouvrage, *Recherche sur les modifications de l'atmosphère*, qui contient une partie sur la construction et l'emploi de thermomètres. Son intérêt pour les thermomètres vient entre autres de la nécessité de corriger les indications barométriques en fonction de la température. De Luc montre qu'il y a plusieurs degrés (90 ° -100 ° C) entre les différentes phases de l'ébullition, depuis le sifflement jusqu'à l'ébullition complète. Pour lui, la « vraie ébullition » est le phénomène dans lequel la première couche d'eau en contact avec la source de chaleur devient saturée en « chaleur », se transformant alors en vapeur sous forme de bulles. De Luc voulait déterminer la température de cette première couche, ce qui était assez difficile expérimentalement comme cette couche était très fine. Des expériences montraient qu'il y avait une différence significative entre la température de cette couche et le reste de l'eau : ainsi, dans une expérience où De Luc introduisait de l'eau dans des fioles métalliques, elles-mêmes dans de l'huile, la température dans l'eau était

autour de 100°C tandis qu'elle était autour de 150°C dans l'huile, ce qui signifiait que la température de la couche de l'eau en contact avec la source de chaleur devait être quelque part entre 100 et 150°C . Dans une autre expérience, De Luc trouva que la température de cette couche devait être autour de 112°C pour que la vraie ébullition se produise, ce qui était au dessus de la température usuellement reconnue pour l'ébullition de l'eau. On en vient donc au problème de la surébullition, mais avant cela, De Luc voulait supprimer le le problème de la présence dans l'eau d'air dissout, qui induisait un phénomène proche de l'ébullition avant celle-ci. Déterminé à étudier la vraie ébullition, De Luc souhaitait obtenir de l'eau totalement purgée de l'air dissout. Il essaya beaucoup de choses, comme secouer durant des semaines un tube d'eau, pour finalement trouver que cette eau privée d'air pouvait atteindre $112,2^{\circ}\text{C}$ avant de bouillir de manière explosive, ce qui était en bon accord avec la première estimation de la température de la première couche de liquide en ébullition : la surébullition de l'eau pure était donc confirmée.

- **L'ébullition normale, avec de nombreuses bulles de vapeur montant régulièrement à la surface ;**
- **Les sifflements, où ces bulles sont recondensées avant d'atteindre la surface ;**
- **Les soubresauts, où de larges bulles de vapeur isolées montent de manière sporadique ;**
- **L'explosion, où une large portion de l'eau se transforme violemment en vapeur, en éjectant l'eau restante ;**
- **L'évaporation seule, où aucune bulle n'est formée mais où beaucoup de vapeur et de chaleur s'échappent régulièrement depuis la surface libre de l'eau ;**
- **Les bouillonnements, qui ressemblent à l'ébullition mais qui ne sont que l'air dissout (ou d'autres gaz) qui s'échappe.**

FIG. 2.3 – Les différentes façons pour l'eau de bouillir d'après De Luc

Au cours du *XIX^{ième}* siècle, des études plus poussées montrèrent que l'ébullition était un phénomène encore plus complexe et plus aléatoire que ce que De Luc avait entrevu. Ainsi, en 1812, Joseph-Louis Gay Lussac (1778-1850) observe que l'eau bout à $101,232^{\circ}\text{C}$ dans un récipient de verre et à $100,000^{\circ}\text{C}$ dans un récipient de métal, ce qui fut rapporté dans le manuel de Jean-Baptiste Biot (1774-1862), qui insistait sur l'importance de savoir si les points fixes en thermométrie étaient « parfaitement constants ». Par la suite, le genevois François Marcet (1803-1883) obtint une surébullition de l'eau ordinaire au delà de 105°C en utilisant des récipients de verre qui avaient contenu de fortes concentrations d'acide sulfurique : la température d'ébullition semble varier selon les solides avec lesquels l'eau est en contact, d'où la recommandation de la Royal Society d'utiliser des récipients en métal.

En fait, il faut faire la différence entre la température que l'eau peut supporter sans bouillir et la température que l'eau conserve en ébullition. Dans le cas de surébullition, où d'extrêmes températures peuvent être atteintes, lorsque l'eau se met à bouillir, la température rediminue. Néanmoins, d'autres causes diverses sont à même de modifier la température d'ébullition, comme la présence de poudres métalliques, ou de poudre de verre, l'insertion d'objets solides, la présence de poussières. Pour s'en affranchir, la Royal Society conseilla non pas d'introduire le thermomètre dans l'eau mais de l'exposer à la vapeur qui se forme au cours de l'ébullition et dont la température semble assez uniforme. Ce n'est qu'avec les travaux de Marcet 65 ans plus tard qu'il fut confirmé que, quelle que soit la température de l'eau, celle de la vapeur variait peu autour de la température standard.

Par la suite, une meilleure compréhension de l'ébullition, qui a lieu lorsque l'eau produit de la vapeur à une pression suffisante pour contrer la résistance de la pression atmosphérique, permit de mieux établir la cohérence de l'utilisation du point d'ébullition (la température de la vapeur d'eau dégagée lors de l'ébullition) en thermométrie et de comprendre notamment la dépendance avec la pression de la température d'ébullition. Pour ce qui est de l'autre point de référence, la température de fusion de la glace, les difficultés furent du même ordre, avec de la même manière l'existence du phénomène de surfusion (l'eau demeure dans l'état liquide au-delà du point de solidification - état métastable analogue à ce qui se passe lors d'une surébullition) et une compréhension encore moins claire du phénomène.

2.2 Comparaison des différents types de thermomètres

Des difficultés à la fois pratiques et théoriques

Nous avons vu la difficulté lorsque la fixité du point d'ébullition de l'eau était mise à mal par des thermomètres eux-mêmes construits à partir de cette fixité. Il était nécessaire de trouver, ou sinon de créer, des circonstances clairement identifiables où il y a bel et bien cette fixité. Pour ce faire, plusieurs stratégies s'offrent à nous :

- Si les causes de variations peuvent être facilement éliminées, il faut les éliminer. Ainsi, les impuretés dissoutes dans l'eau augmentaient la température d'ébullition et il suffisait de les supprimer par distillation ; la variation avec la pression se résolvait en fixant une pression standard.
- Si les causes de variations ne peuvent pas être facilement éliminées mais peuvent être identifiées et quantifiées, il faut apprendre à faire des corrections, comme les relations de conversion pour passer des différentes pressions à la situation standard.
- Ignorer les petites variations en espérant qu'elles s'atténueront : on n'entend plus parler des degrés d'ébullition à partir du *XIX^{ième}* siècle.

Néanmoins, des difficultés encore plus fondamentales subsistent toujours, même en supposant les points fixes correctement établis. En effet, nous voulons mesurer la quantité X : il s'agit de la température. Mais cette quantité X n'est pas directement observable, donc nous l'inférons d'une autre quantité Y (la pression à volume constant ou le volume à pression constante d'un liquide ou d'un gaz) qui est supposée directement observable (et là encore, ce n'est pas donné, même si au *XVIII^{ième}* siècle, peu de doutes sont émis sur la validité des mesures barométriques). Pour cette inférence, nous avons besoin d'une loi qui exprime X en fonction de Y : $X = f(Y)$. La forme de la fonction f ne peut pas être découverte ou testée empiriquement car cela impliquerait de connaître à la fois X et Y , et X est la variable inconnue que nous essayons de mesurer. Il y a donc circularité du problème : on ne peut pas justifier le fonctionnement des instruments de mesure de la température par des principes extérieurs plus généraux, et il faut se limiter à étudier leur cohérence interne (ou intrinsèque).

Une des questions essentielles est celle du choix du fluide thermométrique. Une grande variété de substances furent suggérées : mercure, éther, alcool, air, acide sulfurique, huile de lin, eau, eau salée, huile d'olive, pétrole,... mais trois seulement devinrent de sérieux concurrents pour indiquer la « vraie » température :

- l'air atmosphérique ;
- le mercure (vif argent) ;
- l'alcool éthylique (esprit-de-vin).

Au départ, la thermométrie commença sans grandes préférences dans le choix des substances thermométriques. Les premiers thermoscopes et thermomètres du *XVII^{ième}* siècle fonctionnaient avec de l'air ; ils furent remplacés par des thermomètres du type liquide dans verre, et le liquide le plus utilisé fut un temps l'alcool. Puis Fahrenheit fut responsable dans les années 1710, avec ses thermomètres précis et fiables, de l'établissement de thermomètres à mercure. La plupart des physiciens, notamment ceux qui étaient formés aux Pays Bas (où travaillait Fahrenheit) se mirent à préférer les thermomètres à mercure, sauf en France où le thermomètre à alcool demeura quelques temps du fait de la figure de Réaumur. On pensait initialement que tous les fluides thermométriques se dilataient uniformément avec la température, mais des observations montrant des désaccords entre les différents types de thermomètres accrurent le besoin d'une justification plus poussée.

La méthode des mixtures

Pour garantir une expansion linéaire du volume avec la température d'une substance thermométrique particulière, il est possible d'utiliser la *méthode des mixtures* : on mélange des quantités égales d'eau glacée (à 0°C par définition) et d'eau bouillante (à 100°C par définition) dans un récipient isolé. Si un thermomètre inséré dans ce mélange marque 50°C , alors il indique la vraie température. De tels mélanges peuvent être effectués avec différentes proportions des deux liquides (1 portion d'eau bouillante pour 9 d'eau glacée devrait donner 10°C , etc...), ce qui permet de tester les thermomètres sur l'échelle entre les deux points fixes.

La première utilisation de la méthode des mixtures pour tester les thermomètres fut probablement effectuée par Brook Taylor (1685-1731), le mathématicien anglais des séries de Taylor, secrétaire de la Royal Society

entre 1714 et 1718. En 1723, Taylor publie un court article où il écrit (sans valeurs numériques à l'appui) que le thermomètre à huile de lin est satisfaisant d'après la méthode des mixtures. Plus tard, en 1760, Joseph Black fit le même genre d'expériences sur un thermomètre à mercure et obtint un verdict aussi satisfaisant. Mais c'est Jean-André De Luc qui fit de la méthode des mixtures un test plus systématique pour comparer différents types de thermomètres et montra que les déviations aux valeurs attendues pour un thermomètre à mercure étaient très petites. Les expériences de De Luc et ses arguments en faveur du thermomètre à mercure furent acceptées largement, et un certain consensus se fit en faveur de ce thermomètre autour des années 1800.

Néanmoins, une des hypothèses cruciales de De Luc était que la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer une certaine quantité d'eau était tout simplement proportionnelle à la différence de température, ce qui revenait à supposer que la chaleur spécifique de l'eau était indépendante de la température. De son temps, De Luc n'avait pas de raison de ne pas faire cette hypothèse pratique, mais celle-ci fut remise en question lorsque plus de précision dans la théorie calorifique fut possible.

La théorie calorifique considérait que la chaleur était une substance matérielle qui pouvait être soit ajoutée, soit enlevée, soit transférée d'un corps à l'autre (par analogie avec l'écoulement de l'eau entre différents niveaux). Les irvinistes suivaient la doctrine de William Irvine (1743-1787), collaborateur de Black à Glasgow, qui postulait que la quantité de calorifique contenu dans un corps était le produit de sa capacité calorifique et de sa « température absolue », nulle en totale absence de chaleur. Parmi les irvinistes, le plus important critique de De Luc fut peut-être le physico-chimiste anglais John Dalton (1766-1844), qui doutait de la constance de la chaleur spécifique.

Finalement, des considérations théoriques plus poussées remettaient sérieusement en question la méthode des mixtures en laissant ouverte la question de la constance de la chaleur spécifique de l'eau.

L'échec de la théorie calorifique de Laplace

Des observations de Joseph-Louis Gay Lussac (1802) et indépendamment de Dalton (1802) montraient que tous les gaz se dilataient d'une fraction égale de volume initial quand leur température est augmentée d'une quantité égale. Cela incitait à penser que le comportement thermique des gaz était remarquablement simple et uniforme.

Le début du *XIX^{ième}* siècle connut le développement de la physique laplacienne : le mathématicien, astronome et physicien français Pierre-Simon Laplace (1749-1827) travaillait en association étroite avec le chimiste Claude-Louis Berthollet (1748-1822) et ils proposèrent un programme de recherche en sciences physiques inspiré du modèle newtonien, recherchant une explication mécanique des phénomènes et une description en termes de forces centrales. Après avoir développé un premier argument peu satisfaisant en faveur du thermomètre à air, Laplace essaya de développer un argument plus détaillé et plus quantitatif. Avec une nouvelle définition de la température comme la densité de calorifique intramoléculaire, produite par un procédé continu d'émission et d'absorption entre molécules, Laplace comptait montrer que le thermomètre à air était le « vrai thermomètre de la nature », par le fait que le volume à pression constante serait proportionnel à la densité de calorifique libre. Mais la théorie calorifique de Laplace ne parvenait pas à raisonner en termes de forces, et fut peu à peu abandonnée, même si son traitement de la physique des gaz fut le seul plausible avant le travail de Sadi Carnot dans les années 1840 et 1850 et la seule explication microscopique cohérente avant la théorie cinétique des gaz.

La « comparabilité » de Regnault

Alors qu'il y avait une certaine érosion de la confiance dans toutes les théories de la chaleur, caractéristique de la fin de la physique laplacienne, Henri-Victor Regnault (1810-1878) proposa une solution plus austère. Henri-Victor Regnault fut un temps regardé comme l'expérimentateur le plus formidable d'Europe. Ancien élève de l'école Polytechnique, il y succéda à Gay-Lussac comme professeur de chimie à l'âge de 30 ans, et participa à une commission d'étude sur les machines à vapeur. Il était le maître incontesté des mesures de précision et bénéficiait de moyens importants pour son laboratoire.

Regnault voulait tester toutes les hypothèses par des mesures, ce qui impliquait que les mesures devaient être effectuées sans référence à aucune hypothèse théorique, avec par conséquent une prédilection pour les méthodes de mesure directes. Une des idées phare de Regnault était celle de « comparabilité » : si un thermomètre est à même d'indiquer la vraie température, il doit au moins donner le même résultat dans les mêmes circonstances. De même, si un certain type de thermomètre est un instrument adéquat, tous les thermomètres de ce type doivent au moins être en accord les uns avec les autres.

De Luc utilisa lui aussi cette exigence de comparabilité, quoique de manière moins systématique. Ses résultats montraient que le thermomètre à alcool n'était pas comparable, comme sa dilatation dépendait de sa concentration et que spécifier une concentration standard aurait impliqué de pouvoir mesurer précisément la concentration.

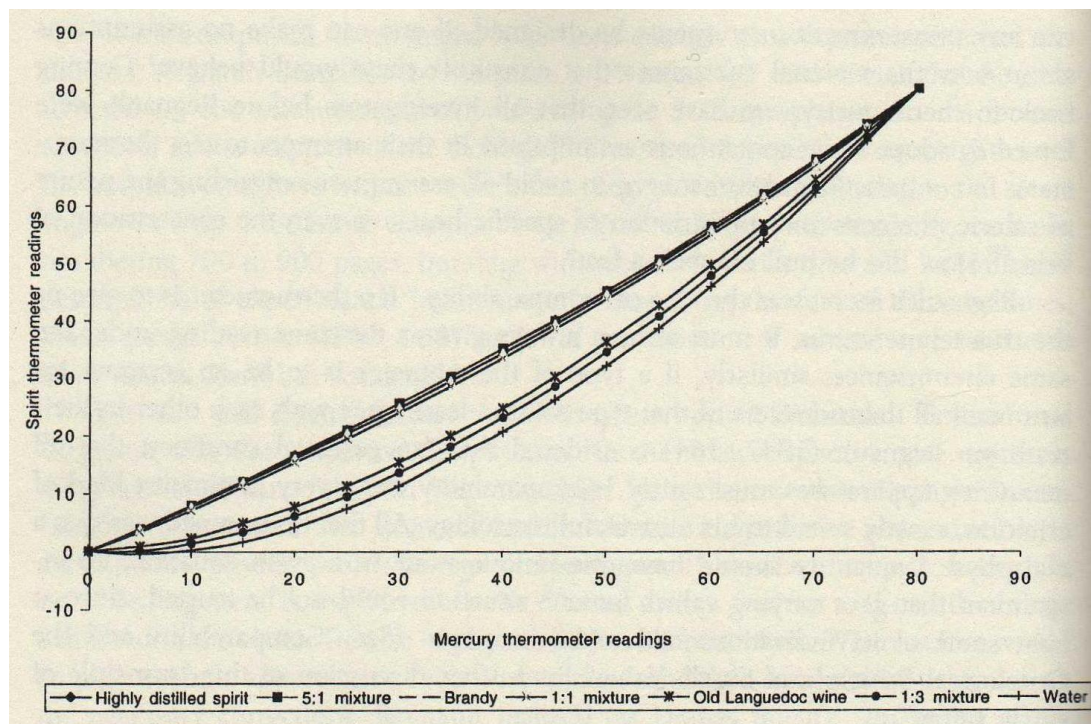


FIG. 2.4 – Comparaison des thermomètres à alcool par De Luc (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Le thermomètre à alcool était donc déjà hors jeu, mais qu'en était-il des deux autres thermomètres usuellement utilisés ? Les thermomètres à mercure différaient de manière significative les uns des autres suivant le verre utilisé, notamment pour des températures au dessus de 100 °C, et des verres de composition identiques mais ayant eu des traitements thermiques différents donnaient des résultats différents.

Air thermometer	Mercury with "Choisy-le-Roi" crystal	Mercury with ordinary glass (thermometer No. 5) ^a	Mercury with green glass (thermometer No. 10)	Mercury with Swedish glass (thermometer No. 11)
100 (°C)	100.00	100.00	100.00	100.00
150	150.40	149.80	150.30	150.15
200	201.25	199.70	200.80	200.50
250	253.00	250.05	251.85	251.44
300	305.72	301.08	—	—
350	360.50	354.00	—	—

Source: Adapted from Regnault 1847, 239.

^aNote that the pattern of expansion of ordinary glass happens to match that of mercury quite well up to nearly 300°C, so that the readings of the air thermometer agrees quite well with the readings of the mercury-in-ordinary-glass thermometer.

FIG. 2.5 – Comparaison par Regnault de thermomètres à mercure fait avec différents types de verre (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Regnault annonça en 1842 le manque de comparabilité du thermomètre à mercure, ce qui faisait du thermomètre à air le seul type cohérent. Regnault s'intéressa néanmoins aux autres gaz pour mettre au point un thermomètre à gaz plus général, et il trouva que la comparabilité était correcte pour les thermomètres à air et hydrogène, mais pour celui à dioxyde de carbone. Avec différentes densités, ces gaz semblaient avoir la même loi d'expansion, même si les coefficients de dilatation différaient suivant les gaz. Néanmoins, des zones de divergence subsistaient, comme le montre la comparaison entre le thermomètre à air et le thermomètre à dioxyde de carbone, ce qui faisait du thermomètre à gaz généralisé un moyen moins fiable que le thermomètre à air.

Air thermometer A		Air thermometer A'		Temperature difference (A-A')
Pressure (mmHg)	Temperature reading (°C)	Pressure (mmHg)	Temperature reading (°C)	
762.75	0	583.07	0	0
1027.01	95.57	782.21	95.57	0.00
1192.91	155.99	911.78	155.82	+0.17
1346.99	212.25	1030.48	212.27	-0.02
1421.77	239.17	1086.76	239.21	-0.04
1534.17	281.07	1173.28	280.85	+0.22
1696.86	339.68	1296.72	339.39	+0.29

Source: Adapted from Regnault 1847, 181.

FIG. 2.6 – Comparaison par Regnault de thermomètres à air de densités différentes (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Finalement, pour Regnault, le thermomètre à air est le seul instrument de mesure que l'on peut employer avec confiance pour la détermination des températures élevées, notamment au-delà de 100 °C, mais par habitude, le thermomètre à mercure demeure très répandu.

2.3 Aller au-delà des points fixes

Après l'établissement des éléments les plus simples dans la mesure de la température (points fixes, échelle numérique), et l'obtention d'une rigueur accrue dans l'échelle numérique au cours du *XIX^{ième}* siècle, apparut le nouvel objectif d'étendre l'échelle au delà de la gamme de température dans laquelle elle fut établie. On eut évidemment des problèmes aux points de fusion et de congélation du mercure : si un accord assez correct est obtenu entre les deux points fixes, des irrégularités sont observées au-delà avec les thermomètres usuels, comme le montre une étude faite par De Luc sur le thermomètre à mercure.

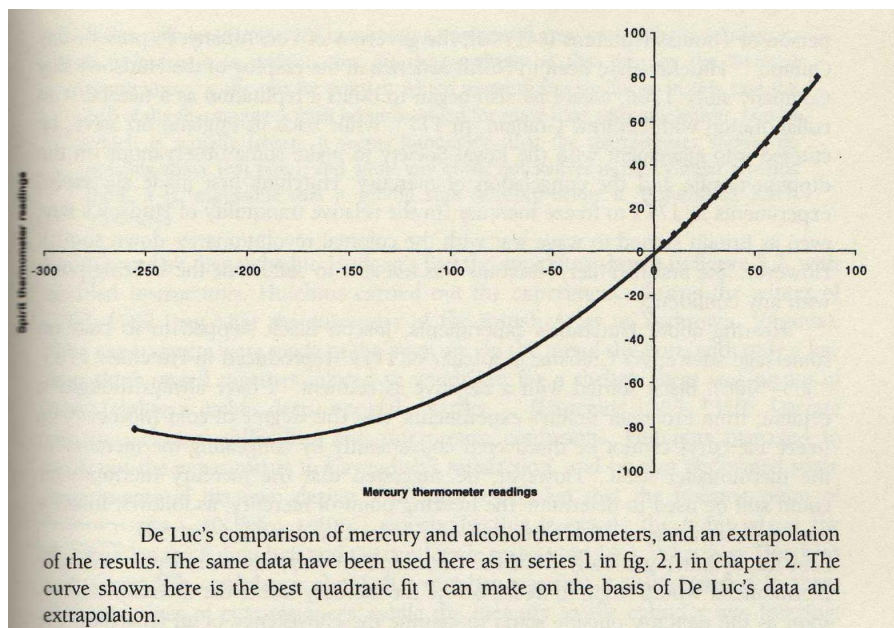


FIG. 2.7 – Comparaison par De Luc du thermomètre à mercure (horizontalement) et du thermomètre à alcool (verticalement) (H. Chang, *Inventing Temperature*)

L'échelle de Wedgwood

La prochaine étape est d'étendre l'échelle aux températures élevées ou très basses. Les températures élevées étaient bien connues et couramment utilisées dans l'industrie. Le mercure était incapable de mesurer certaines hautes températures, comme il était connu que le mercure se mettait à bouillir entre 600 ° F et 700 ° F (entre 315 ° C et 370 ° C). Au lieu d'utiliser l'expansion thermique de différents métaux, Josiah Wedgwood (1730-1795), fabricant de porcelaine connu dans toute l'Europe, utilisa des compositions d'argile et d'oxyde de fer qui changeaient de couleur avec la température, puis une technique plus efficace : la diminution de la masse de pièces d'argile lors de la combustion. Cette diminution de masse dépendait peu de la durée de l'exposition et des basses températures précédant ou suivant le pic de température. De cette manière, Wedgwood parvint à mettre des chiffres sur une large gamme de hautes températures, formant son échelle propre. Pour connecter son échelle et l'échelle basée sur le mercure de Fahrenheit, Wedgwood chercha une échelle de température intermédiaire qui recouvrirait des zones des deux autres échelles : il utilisa pour cela (suivant la tradition en pyrométrie) d'utiliser la dilatation des métaux et choisit l'argent.

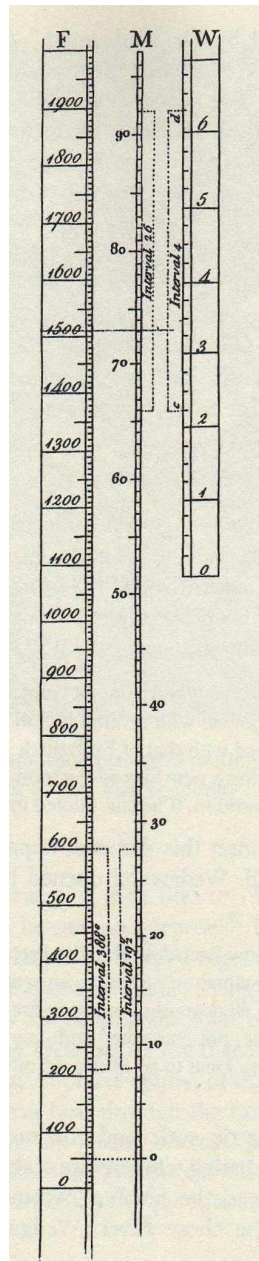


FIG. 2.8 – La superposition faite par Wedgwood de trois échelles de température : l'échelle de Fahrenheit (F), l'échelle intermédiaire à l'aide d'un métal (M) et sa propre échelle (W) (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Si les mesures de Wedgwood furent les premières valeurs plausibles au delà de la limite supérieure du thermomètre à mercure, elles furent assez critiquées, notamment du fait des difficultés de reproduire les pièces d'argile utilisées par Wedgwood. Un autre problème important était celui de la linéarité : Wedgwood ne justifiait pas son hypothèse que la dilatation et la contraction de son argile était linéaire avec la température. Mais ces hypothèses ne pouvaient pas être testées sans une méthode de mesure de la température indépendante, et il n'y en avait pas.

Phenomenon	°Wedgwood	°Fahrenheit
Greatest heat of Wedgwood's air-furnace	160	21877
Cast iron melts	130	17977
Welding heat of iron, greatest	95	13427
Welding heat of iron, least	90	12777
Fine gold melts	32	5237
Fine silver melts	28	4717
Swedish copper melts	27	4587
Brass melts	21	3807
Red-heat fully visible in daylight	0	1077
Red-heat fully visible in the dark	-1	947
Mercury boils	-3.673	600

Source: Wedgwood 1784, 370.

FIG. 2.9 – Certaines hautes températures mesurées par Wedgwood et leur conversion en degrés Fahrenheit (H. Chang, *Inventing Temperature*)

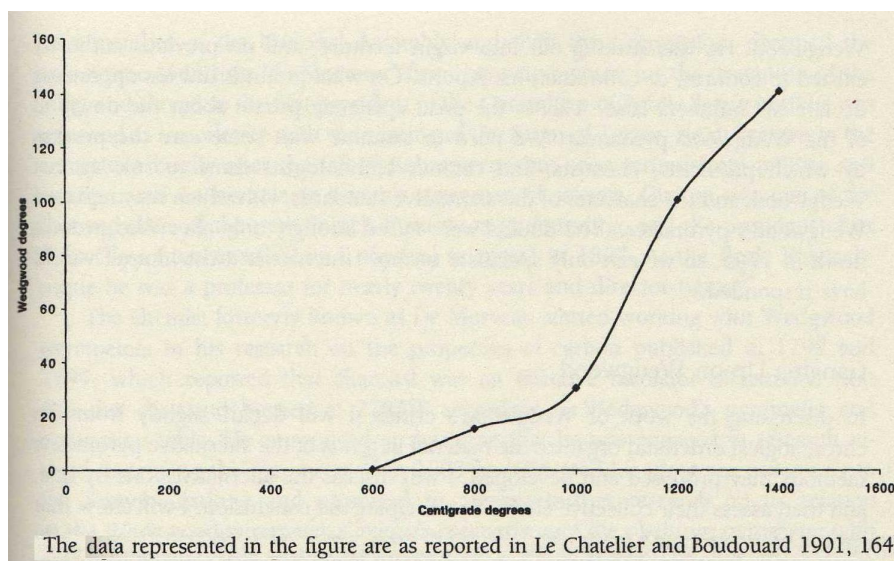


FIG. 2.10 – Des problèmes de linéarité manifestes : Comparaison de la fin du $XIX^{ième}$ siècle des degrés Wedgwood et des degrés Celsius (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Autres méthodes pyrométriques

Afin de sonder les hautes températures, il était possible d'utiliser le nouveau matériau qu'était le platine, supportant des degrés de chaleur supérieurs aux autres métaux (Louis-Bernard Guyton de Morveau (1737-1816), puis redécouvert par John Frederic Daniell (1790-1845)), mais il n'y avait toujours pas de raison pour que la dilatation soit linéaire avec la température.

On pouvait aussi déduire la température d'un objet par calorimétrie avec de la glace ou de l'eau : la température initiale d'un objet pourrait être déduite de la quantité de glace qu'il peut faire fondre, ou de l'augmentation en température qu'il peut induire sur une masse d'eau liquide. Ces méthodes sont fondées sur l'hypothèse de la conservation de la chaleur, ainsi que d'autres hypothèses sur la chaleur spécifique du corps en question. Lavoisier et Laplace l'utilisèrent (1783, mémoire sur la chaleur).

Le temps mis par un objet à se refroidir après chauffage jusqu'à une température inférieure bien déterminée fut une piste pour la mesure des hautes températures. La méthode fut utilisée par Newton pour des températures au delà du point de fusion du plomb, puis plus précisément par Dulong et Petit. Le problème fondamental demeure : pour vérifier la loi de refroidissement, une mesure indépendante de la température est nécessaire.

Pour rester le plus possible près des résultats connus, on pouvait imaginer une pyrométrie à air : c'est une des méthodes les plus envisageables, même s'il faut attendre les travaux de Regnault dans les années 1840 pour montrer la supériorité du thermomètre à air. Un des problèmes majeurs est que le tube contenant l'air doit rester solide quand la température augmente, d'où la nécessité de matériaux plus résistants.

Toutes ces méthodes alternatives à celle de Wedgwood ont aussi leurs limites ; le thermomètre de Wedgwood fut globalement rejeté alors qu'aucune autre méthode n'était alors clairement supérieure à la sienne, que ce soit en principe ou en pratique : l'argument majeur fut que les autres méthodes, bien qu'incertaines en elles mêmes, semblaient converger dans leurs résultats.

Le problème théorique de l'élargissement de la mesure à d'autres domaines de température

Il est possible d'étudier cet élargissement de la gamme des températures mesurées à l'aune de l'opérationnalisme de Percy Williams Bridgman (1882-1961), qui publie en 1927 *The Logic of modern Physics*. Dans cet ouvrage, Bridgman cherche à donner une définition du concept physique en fonction des opérations qu'il recouvre.

Les opérations de mesure n'ont pas des domaines d'application illimités et par conséquent, nos structures conceptuelles font des liens permettant d'utiliser les mêmes mots alors que les méthodes de mesure changent, comme c'est le cas lorsqu'on passe d'un domaine de température à un autre (avec différents thermomètres, différentes substances thermométriques pour différentes gammes de température). Mais il ne peut y avoir ces liens sans une certaine continuité, et si on réduit la signification d'un objet à des opérations de mesure, il n'est pas possible d'avoir ou d'imposer une continuité au niveau du sens là où il y a une discontinuité évidente des opérations de mesure. C'est un problème dont Bridgman fut conscient, mais qu'il résolu de manière assez faible : il proposa qu'il y aurait une continuité des résultats numériques dans les zones de recouvrement entre deux méthodes de mesure distinctes. Mais si cette convergence numérique est une condition nécessaire pour qu'il y ait continuité du concept, ce n'est pas une indication de la continuité. De plus, si l'on accepte la doctrine de Bridgman, il n'y a plus vraiment de raison de trouver des extensions aux concepts : un concept est limité par le domaine d'application de sa méthode de mesure. Il faudrait peut être accepter une construction progressive des méthodes de mesures, qui convergeraient alors vers une plus grande précision et une plus grande adéquation, un peu comme procède la science de manière générale.

Chapitre 3

L'échelle absolue de température

3.1 La compréhension théorique de la température

Au cours du *XIX^{ième}*, la température devient mesurable de manière cohérente et précise, mais cela sans grande compréhension théorique. La connection entre la thermométrie et la théorie de la chaleur fut difficile.

Les thermomètres acquièrent la fiabilité et la précision avant qu'on ne puisse précisément dire ce qu'ils mesuraient vraiment. Ainsi, il semble que l'existence d'échelles dans l'ordre inverse de l'ordre utilisé aujourd'hui (l'échelle initiale de Anders Celsius, ou bien celle de Delisle) pourrait être liée à la mesure de « degré de froid » et non de degrés de chaleur. D'autres échelles, comme celle d'Amontons en 1703, font coexister les deux types d'échelle.

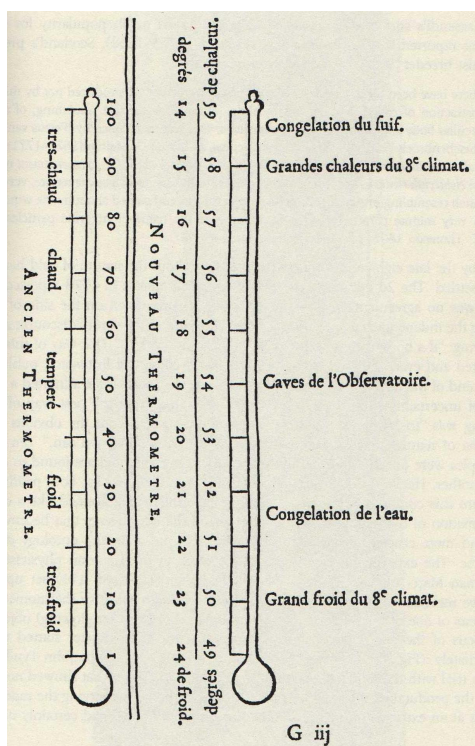


FIG. 3.1 – Le thermomètre d'Amontons (1703), avec une double échelle (H. Chang, *Inventing Temperature*)

La nature du froid n'est toujours pas résolue à la fin du *XVII^{ième}* siècle. Dans l'antiquité, Aristote pensait le froid sur le même plan que le chaud, avec certaines propriétés opposées. Pour Francis Bacon (1561-1626), la chaleur est un certain type de mouvement d'expansion et le froid un type similaire de mouvement de contraction. Dans ces théories, le froid et le chaud ont le même statut ontologique. Robert Boyle (1627-1691) voulait supprimer la réalité positive du froid, mais dû reconnaître son incapacité à le faire. Pierre Gassendi (1592-1655) avait une théorie mécanique plus complexe, où des « atomes calorifiques » étaient à l'origine de la chaleur en agitant les particules de la matière ordinaire, tout en postulant en regard des « atomes frigorifiques » dont les formes angulaires et la lenteur feraient diminuer le mouvement des atomes. La théorie de Gassendi fut assez populaire. L'expérience de Marc-Auguste Pictet (1752-1825) sembla un temps montrer l'existence du froid en tant que tel, mais par la suite, la théorie calorique de la chaleur ne laissa plus trop de place pour une notion positive de froid.

La première compréhension théorique de la température vint à la fin du *XVII^{ième}* siècle avec différentes théories caloriques. Un exemple de ces théories est donné par les irvinistes, d'après le physicien écossais William Irvine (1743-1787). Les irvinistes définissaient la température comme la quantité de chaleur totale contenue dans un corps, divisée par la capacité calorifique de ce corps. Cette « température absolue » était comptée à partir du « zéro absolu », point d'absence totale de calorique. Les prédictions faites à partir des hypothèses d'Irvine ne furent pas confirmées pour la plupart. Ainsi, les valeurs du zéro absolu étaient tellement incertaines (Laplace et Lavoisier en donnèrent des estimations irvinistes allant de -600°C à $-14\,000^{\circ}\text{C}$; Dalton, irviniste convaincu, admettait que la valeur qu'il prétendait être la plus probable, -6450°F soit -3600°C , dérivait de résultats allant de $-11\,000^{\circ}$ à -4000°F soit de -6130°C à -2240°C) qu'elles indiquaient presque plutôt la non existence du zéro absolu.

Si les théories caloriques échouèrent à relier la thermométrie au concept théorique de température, ce n'est qu'au *XIX^{ième}* siècle que les théories dynamiques purent en rendre compte de manière précise et quantitative. Le premier théoricien dynamiste d'envergure est sans doute Benjamin Thompson Rumford (1753-1814), qui envisageait les molécules vibrant autour de positions fixes, même dans les gaz, et non évoluant de manière aléatoire. Il imaginait que la température dépendait de la fréquence de vibration, et rejetait l'idée d'un zéro absolu, car il considérait la température comme une grandeur relative. Les pionniers de la théorie cinétique des gaz croyaient eux au mouvement aléatoire des molécules : ce sont eux qui sont à l'origine de l'interprétation actuelle de la température comme mesure de l'énergie cinétique des molécules. Daniel Bernoulli (1700-1782) expliqua très tôt la pression des gaz comme une conséquence des chocs des particules, et montra qu'elle était proportionnelle à la *vis viva* des molécules individuelles (c'est-à-dire mv^2 , dans la notation actuelle). Il n'identifia toutefois pas la *vis viva* moléculaire à la température. La première conception théorique de ce type semble remonter à John Herapath (1790-1868), qui imaginait que la température était proportionnelle à la vitesse des molécules et non au carré de la vitesse. Le travail de Herapath fut largement méconnu, mais fut repris en partie par James Joule à la fin des années 1840. Tout aussi méconnu est le travail de John James Waterson (1811-1883), qui pourrait avoir été la première personne à avoir identifié en 1843 la température comme proportionnelle à mv^2 : son article, soumis à la Royal Society en 1845, fut rejeté et jeté aux oubliettes jusqu'à ce que Lord Rayleigh le découvre dans les archives de la Royal Society et le publie en 1891. Au milieu du *XIX^{ième}* siècle, il n'y avait donc pas de consensus sur la nature de l'origine de la température, et il était difficile de faire le lien entre les différentes hypothèses théoriques et les mesures pratiques.

3.2 L'expansion des gaz

Après avoir montré que les thermomètres à air étaient les plus cohérents intrinsèquement, Regnault avait voulu étudier les thermomètres à gaz de manière plus générale. Si chaque thermomètre à gaz définit une échelle centigrade de température différente, ces échelles sont presque confondues aux températures usuelles.

Pour avoir une idée plus précise de l'histoire des thermomètres à air, il faut remonter aux travaux du français Guillaume Amontons (1663-1705), qui mena en 1699 les premières expériences spécifiquement destinées à mesurer la dilatation de l'air avec la chaleur. Ce phénomène était certes déjà connu (Philon de Byzance, Héron d'Alexandrie, thermomètres et thermoscopes de Galilée et Santorio Santorio), mais il n'avait pas fait l'objet d'études quantitatives aussi poussées. Amontons mesurait non pas la dilatation de l'air, mais l'augmentation de sa pression à volume constant : le dispositif utilisé était un tube de verre en U avec à une extrémité un ballon contenant de l'air, l'autre extrémité ouverte à la pression atmosphérique, une petite quantité de mercure permettant de séparer les deux.

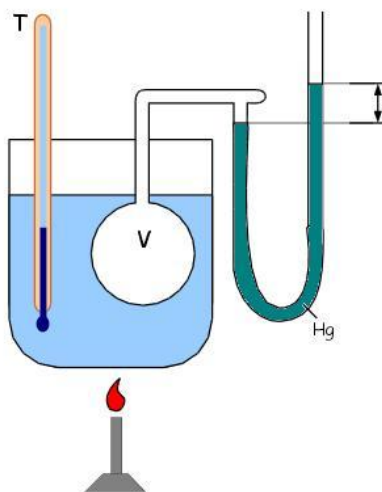


FIG. 3.2 – Le dispositif d'Amontons

Amontons obtint que la pression de l'air augmente à peu près d'un tiers lorsque celui-ci est chauffé de la température ambiante à la température de l'eau bouillante. En utilisant la loi de Boyle (le volume d'un gaz est inversement proportionnel à sa pression), Amontons montre qu'une augmentation similaire en volume aurait lieu à pression fixée. C'est en 1702, dans une publication à l'Académie des Sciences, qu'apparaît pour la première fois sa compréhension de l'existence d'un zéro absolu, au-delà de toutes les températures rencontrées auparavant. En 1703, il définit formellement ce qu'il appelle « l'extrême froid » de son thermomètre, point où l'air n'exercerait aucune pression, qu'il situe à -239.5°C , en supposant que la pression de l'air diminue uniformément avec la température. Même si Nicolaas Samuel Cruquius en Hollande et le mathématicien italien Giovanni Poleni confirmèrent les observations d'Amontons, sa définition ne fut jamais largement acceptée au cours du *XVII^{ième}* siècle, et lorsque l'intérêt pour le zéro absolu fut ravivé par les irvinistes, elle ne fut même pas mentionnée dans les débats des années 1780-1790. Elle eut donc assez peu d'importance dans la thermométrie jusqu'aux travaux de De Luc montrant la bonne « comparabilité » du thermomètre à air.

En réalité, l'expérience montre que quand la pression tend vers zéro, l'échelle de tout thermomètre à gaz tend vers une échelle limite indépendante du gaz et du type de thermomètre : il s'agit de l'échelle *thermométrique des gaz parfaits* et s'obtient par extrapolation des échelles de gaz réels. Sir William Thomson (1824-1907), mieux connu en tant que Lord Kelvin, physicien britannique inventa un zéro absolu correspondant à l'absence absolue de chaleur et à l'absence absolue de pression d'un gaz, dont il avait remarqué les variations linéaires. Il a laissé son nom à l'échelle de température, dite absolue, ou température « thermodynamique », notée T , et mesurée en kelvins (K).

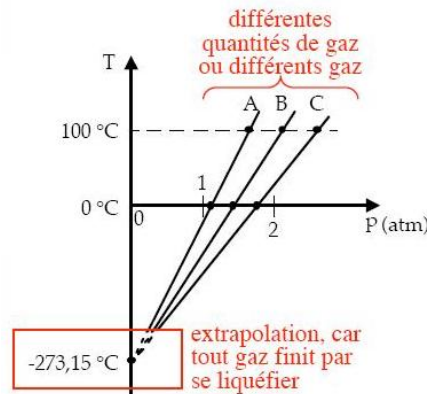


FIG. 3.3 – Extrapolation d’une échelle de température pour les gaz parfaits - Variation de la pression à volume constant

Pour les gaz parfaits, on a donc à volume constant :

$$P = P_0(1 + \beta\theta) = P_0\beta\left(\frac{1}{\beta} + \theta\right)$$

où β est le coefficient d’augmentation de pression à volume constant et θ est la température en degrés Celsius. Cette équation se simplifie en changeant l’origine des températures et en posant :

$$T = \theta + \frac{1}{\beta}$$

T est la température absolue ou température Kelvin ; l’origine ($T = 0$) de l’échelle Kelvin est le zéro absolu, dont la température dans l’échelle centigrade est $\theta_0 = -\frac{1}{\beta}$. La moyenne des meilleures déterminations est $\theta_0 = -273,15^\circ\text{C}(\pm 0,02^\circ\text{C})$.

L’échelle absolue des gaz parfaits peut être définie sans référence à l’échelle centigrade, en posant que pour un gaz parfait, les quantités $\frac{P}{T}$ et $\frac{V}{T}$ sont constantes, respectivement à volume et à pression fixés, et en choisissant une convention fixant la « taille » des degrés et les constantes de proportionnalité. Il est aussi possible de se fixer une condition unique, comme fixer arbitrairement la température d’un point fixe fondamental unique, ce que fit la Conférence Internationale des Poids et Mesures siégeant à Paris en 1954, qui a fixé à $273,16\text{K}$ la température absolue du point triple de l’eau, point d’équilibre des trois formes de l’eau : solide, liquide et vapeur. La convention reste liée aux propriétés d’un corps pur particulier, mais la pression atmosphérique normale n’intervient plus. Cette valeur est naturellement issue des meilleures mesures faites avec les conventions centigrades, et sauf pour un facteur multiplicatif, l’échelle Kelvin n’est pas liée aux propriétés d’un corps particulier : on conçoit qu’elle représente une grandeur physique fondamentale, susceptible d’une définition thermodynamique générale.

3.3 Théorème de Carnot et température Kelvin

Au cours du $XIX^{ième}$ siècle, la Thermodynamique se développe pour fournir ses propres concepts et approches des phénomènes physiques. William Thomson (1824-1907), mieux connu par la suite comme Lord Kelvin, construisit un nouveau concept théorique de température, grâce à un usage ingénieux de la nouvelle théorie thermodynamique, et fit de ce concept une grandeur mesurable. De manière générale, le travail de Thomson est marqué par le souci de la formulation mathématique des problèmes envisagés, tout en cherchant ensuite à faire le lien entre la formulation abstraite et des situations empiriques concrètes. Thomson fut un temps l'assistant de Regnault, admirant sa grande précision. Mais il était désireux d'aller au-delà de la « comparabilité » de Regnault, qui ne permettait pas la mise en place d'une échelle de température *absolue* : Thomson avait besoin d'un principe thermodynamique général sur lequel fonder la thermométrie, afin de pouvoir exprimer la température en fonction d'autres concepts généraux. Alors peu connue, la théorie des machines thermiques, développée par l'ingénieur militaire Sadi Carnot (1796-1832), allait lui fournir ce qu'il cherchait, comme elle donnait une relation théorique entre le chaleur et le travail mécanique. Cette théorie donne en effet une relation entre les trois paramètres que sont la chaleur, la température et le travail : si l'on peut mesurer la chaleur et le travail, on peut en déduire la température.

La théorie de Carnot

L'intérêt assez répandu pour les machines thermiques au début du $XIX^{ième}$ siècle vient en grande partie sur le rôle important qu'elles jouèrent dans la Révolution Industrielle, en particulier les machines à vapeur. Dans une machine à vapeur typique, la vapeur est générée dans une chaudière et guidée dans un cylindre, poussant un piston et générant par conséquent du travail mécanique.

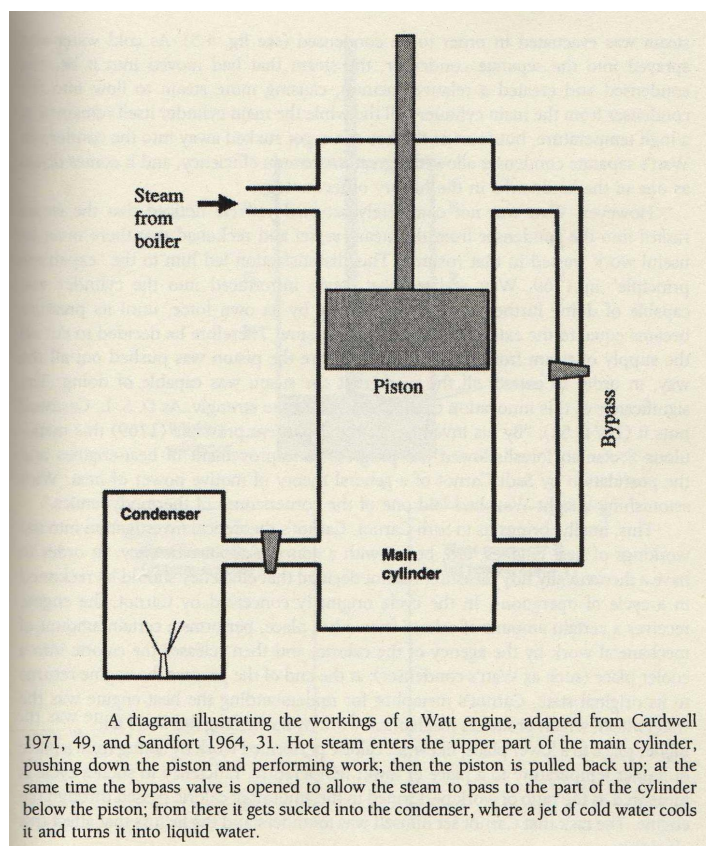


FIG. 3.4 – Machine à vapeur de Watt (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Il était ensuite nécessaire de condenser la vapeur : James Watt (1736-1819) fit des améliorations décisives pour le fonctionnement des machines à vapeur, notamment en réduisant la quantité d'eau froide nécessaire pour la condensation au minimum, par une compréhension théorique de la chaleur latente. Si cette innovation diminuait la consommation, elle réduisait aussi la puissance de l'engin. Pour palier à ce problème, Watt inventa un condenseur séparé, dans lequel la vapeur était évacuée pour être condensée. Néanmoins, il remarqua que la vapeur se précipitait dans le condenseur, ce qui était une perte de travail potentiel : le cylindre était capable de fournir un peu plus de travail en revenant à la pression atmosphérique et en plaçant un piston pour stopper l'arrivée de vapeur, on pouvait extraire la totalité du travail possible.

Les recherches sur les machines thermiques entreprises par Carnot eurent, elles aussi, pour origine un souci d'efficacité : pour avoir une mesure propre du rendement, Carnot le définit sur un cycle d'opérations. Le cycle initialement imaginé par Carnot est tel que la machine reçoit une certaine quantité de chaleur d'une source chaude, produit une certaine quantité de travail mécanique, relâche la chaleur dans une zone plus froide (comme le condenseur de Watt), pour ensuite revenir à l'état initial. Le rendement d'un cycle est mesurée par le rapport du travail fourni sur la quantité de chaleur ayant traversé la machine thermique.

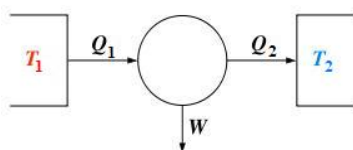
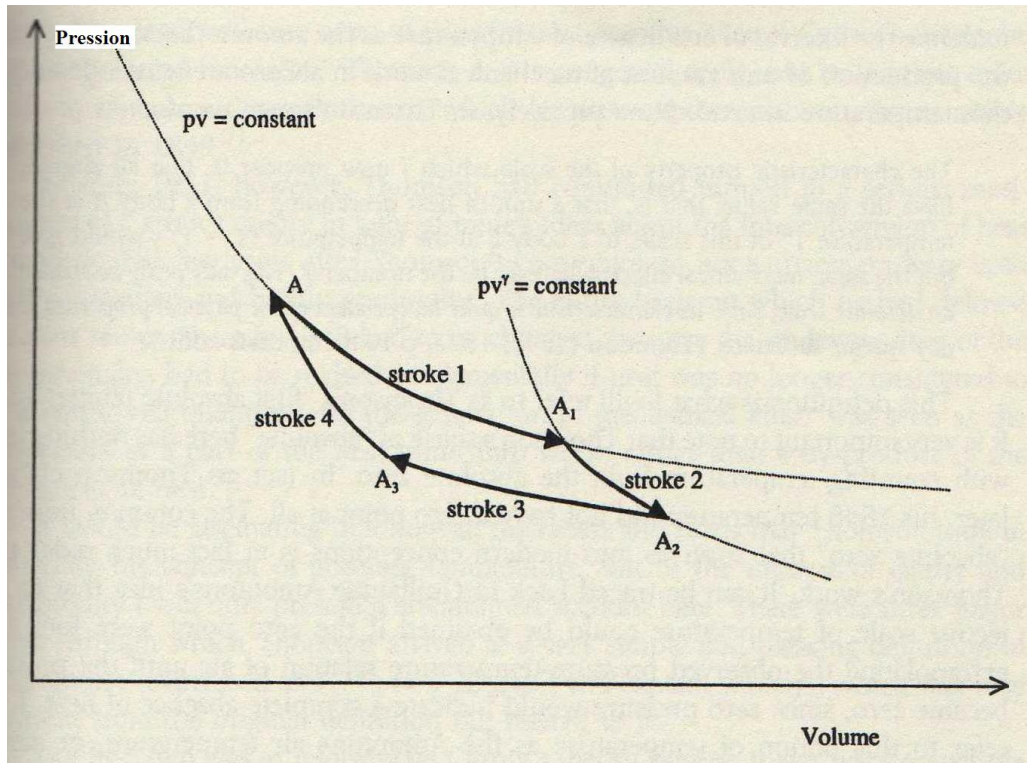


FIG. 3.5 – Schéma de fonctionnement d'une machine thermique à deux sources de chaleur de température T_1 et T_2 ($T_1 > T_2$). Q_1 : quantité de chaleur cédée par la source chaude; Q_2 : quantité de chaleur cédée à la source froide; W : travail fourni.

Carnot réussit à dégager l'essence du fonctionnement de toutes les machines thermiques sous une forme abstraite, en considérant un cycle réversible (et donc idéalisé). Le cycle de Carnot peut s'effectuer en quatre étapes :

1. *Détente isotherme* (AA_1) : le fluide, initialement à la température T_1 , reçoit la quantité de chaleur Q_H d'un réservoir de chaleur à la température T_1 et se dilate, poussant le piston et produisant un certain travail W_1 ;
2. *Détente adiabatique* (A_1A_2) : le contact thermique avec la source chaude est supprimé, le réservoir est thermiquement isolé. La détente se poursuit adiabatiquement, la température baisse et le système produit un travail additionnel W_2 ;
3. *Compression isotherme* (A_2A_3) : lorsque le gaz atteint la température T_2 , on établit le contact thermique avec la source froide à la température T_2 et on comprime le gaz de manière isotherme au contact de cette source. Le gaz cède une quantité de chaleur Q_2 à la source froide ;
4. *Compression adiabatique* (A_3A) : on arrête la compression isotherme en supprimant le contact avec la source froide. Le gaz s'échauffe lors de la compression et le ramène à l'état initial.

FIG. 3.6 – Représentation de Clapeyron du cycle (H. Chang, *Inventing Temperature*)

Le rendement du cycle d'opérations est défini par $\eta = \frac{|W|}{Q_1} = \frac{-W}{Q_1}$ où $W = W_1 + W_2$ est le travail total fourni par le cycle.

Avec le Premier Principe de la Thermodynamique, on a $W + Q_1 + Q_2 = 0$, d'où :

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

La conception de Thomson de la température absolue

En 1848, l'idée initiale de Thomson était de définir l'intervalle de un degré de température comme la quantité qui résulterait de la production d'une unité de travail dans une machine utilisant un cycle de Carnot entre deux températures séparées par cet intervalle. Cette échelle donnerait une échelle de température *absolue*, au sens où elle ne serait pas reliée à un matériau particulier (et non absolue au sens où elle aurait un zéro absolu).

Thomson abandonna peu à peu cette première définition de la température absolue, notamment à la lumière des idées de James Joule (1818-1889). Il reformula tout d'abord la théorie de Carnot afin de la rendre compatible avec la conservation de l'énergie, puis remis en cause certaines suppositions injustifiables faites par Carnot, pour finalement arriver à la formule :

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

où les T indique les températures absolues des isothermes et les Q les quantités de chaleur absorbées ou émises lors des isothermes. Cette relation, liant les températures Kelvin au rapport des quantités de chaleur sans référence particulière aux gaz parfaits, permet une définition thermodynamique de la température Kelvin à une constante arbitraire près. Cette constante est donnée par une convention, par exemple en donnant une

valeur numérique déterminée à la température d'un point fixe. La convention utilisée est en général de fixer la température du point triple de l'eau à $T_0 = 273,16K$, ce qui équivaut en fait à poser égale à 100 degrés la différence entre la température de la vapeur d'eau bouillante et la température de la glace fondante, sous pression atmosphérique normale. La température $0K$ correspond à une limite inférieure inaccessible appelée le « zéro absolu ».

Après avoir développé une définition théorique de la température, il était nécessaire d'opérationnaliser ce concept, c'est-à-dire d'en permettre des mesures pratiques, ce qui ne fut pas aisé avant le $XX^{ième}$ siècle. Une des difficultés majeures de Thomson fut l'idéalisation par Carnot de sa machine thermique : supposer le cycle parfaitement réversible, revenait à postuler l'absence de friction et de toutes formes de dissipation. Afin de faire le lien entre la définition abstraite de la température et les données empiriques, il fallait utiliser un modèle suffisamment concret, mais suivant toujours les propositions de Carnot sur le rendement. Malgré les efforts de Thomson pour ne pas impliquer les propriétés empiriques d'une certaine substance, c'est grâce aux thermomètres à gaz que l'on va finalement pouvoir approximer la température absolue.

Les thermomètres à gaz pour approcher la température absolue

L'opérationnalisation du concept de Thomson pour la température absolue se fit lentement et graduellement. La plupart des méthodes se basaient sur l'hypothèse, explicite ou non, qu'un gaz parfait donnerait exactement la température absolue. Pour cela, il faut que le gaz parfait se dilate uniformément avec la température absolue : il y a circularité du problème, dans la mesure où nous devons connaître la température absolue afin d'exprimer le comportement du gaz en fonction de la température absolue. L'argument doit donc se situer au niveau théorique, ce que Thomson fit, pour finalement montrer que la température d'Amontons donnée par un gaz parfait se comporte comme la température absolue de Thomson : l'échelle de température absolue du gaz parfait s'identifie avec l'échelle thermodynamique de Kelvin.

En 1887, le Bureau International des Poids et Mesures, fondé en 1875 et situé depuis 1884 au Pavillon de Breteuil à Sèvres, adopte l'échelle à hydrogène à volume constant, appelée *Échelle normale à hydrogène*, fondée sur des points fixes au point de congélation de l'eau ($0^\circ C$) et au point de vapeur de l'eau ($100^\circ C$), comme échelle pratique internationale de métrologie. Cette décision fut ratifiée par la première Conférence générale en 1889 et s'appuie en partie sur les travaux de Chappuis, qui examine en détail les différents thermomètres à gaz à volume constant. En étudiant tour à tour l'hydrogène, l'azote et dioxyde de carbone, il tire la conclusion que le thermomètre à volume constant est un étalon pratique plus commode que le thermomètre à pression constante.

Finalement, ce n'est pas sûr que la théorie de Carnot sur les machines thermiques était réellement nécessaire pour définir la température absolue, même si ce fut sans doute pratique au départ. En s'écartant des machines thermiques, et même de toute la thermodynamique classique, la température du gaz parfait peut être reliée à la théorie cinétique des gaz.

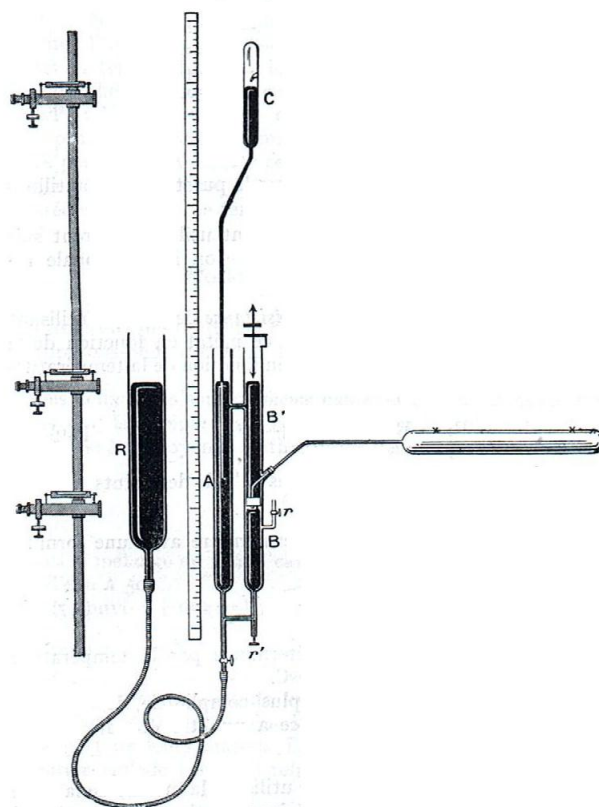


FIG. 3.7 – Thermomètre normal à hydrogène utilisé au Bureau International des Poids et Mesures, ayant surtout servi à la fin du *XIX^{ième}* siècle à déterminer un certain nombre de points fixes facilement reproductibles correspondant à des changements d'état de corps purs. La pression du gaz est mesurée par la hauteur d'une colonne de mercure dont la surface libre inférieure (B) est en contact avec le gaz et dont la surface libre supérieure (C) est dans une chambre barométrique. Pour réaliser les conditions d'un « gaz parfait », il faudrait opérer avec un gaz raréfié sous pression très faible à 0°C : la hauteur de la colonne de mercure serait alors très faible et sa mesure serait assez imprécise. C'est pourquoi on opère sous pression notable, la colonne de mercure à 0°C ayant une hauteur de un mètre. (G. Bruhat, *Thermodynamique*)

Aujourd'hui, l'Échelle Internationale de Température de 1990, adoptée par le Comité International des Poids et Mesures en 1989, détermine les thermomètres de référence qui permettent d'approcher au mieux la température thermodynamique, la température qu'un corps acquiert lorsqu'il est en contact et en équilibre thermique avec un gaz parfait. Depuis la fin du *XIX^{ième}* siècle, la thermométrie a trouvé de nouvelles méthodes, de plus en plus précises, pour accéder à la température des domaines usuels, tout en élargissant la gamme des températures mesurables par l'introduction de nouveaux étalons de mesure. Ainsi, l'Échelle Internationale de Température de 1990 couvre un domaine de température allant de $0,65K$ jusqu'aux plus hautes températures mesurables grâce à la loi de radiation de Planck en utilisant des radiations monochromatiques, y compris les températures des étoiles. Ainsi, entre $0,65K$ et $5,0K$, la température est définie grâce aux relations température-pression de 3He et 4He . Entre $3,0K$ et le point triple du néon ($24,5561K$), la température est définie grâce à un thermomètre à Hélium correctement étalonné et corrigé ; entre le point triple de l'hydrogène ($13,8033K$) et le point de solidification de l'argent ($961,78^\circ C$), elle est définie grâce à des thermomètres à résistance de platine calibrés correctement à certains points fixes et avec des procédures d'extrapolation spécifiques ; et au-delà du point de solidification de l'argent ($961,78^\circ C$), elle est définie grâce à un point fixe particulier et à la loi de Planck, reliant la luminosité d'un objet à sa température.

On voit donc que la thermométrie a bénéficié de la plupart des avancées techniques et théoriques du *XX^{ième}* siècle, et en particulier de la Mécanique Quantique, sur laquelle est basée la loi de Planck et qui a permis et stimulé le chemin vers les températures extrêmement basses dont rend compte l'échelle de 1990.

En plus de l'intérêt pratique et de l'importance théorique que représente la compréhension et la capacité de mesurer la température, nous avons pu voir comment à partir d'une sensation s'est construit un concept théorique. Tout d'abords, des instruments de mesure qualitatifs, les thermoscopes, rendent compte de cette sensation, la corrigeant même parfois, car les sensations ne sont pas infaillibles. Puis on construit des échelles pour quantifier objectivement le phénomène, tout en recherchant des appuis théoriques pour valider le fonctionnement des thermomètres, et en cherchant à élargir la gamme des phénomènes observables. Dans cette démarche de construction, pas à pas, d'un concept qui se dessine et se précise, se consolide, au fur et à mesure des avancées, on peut voir une image de la Science elle-même : à partir des sens et de l'usage de la raison, la Science parvient à construire un édifice qui permet d'expliquer un tant soit peu le monde qui nous entoure. Et cet édifice, sans cesse remis en cause, bouleversé, amélioré, semble néanmoins converger pour nous donner une idée de moins en moins erronée du monde.

Références

1. H. Chang, *Inventing Temperature, Measurement and Scientific Progress*, Oxford Studies in Philosophy of Science, 2004
2. G. Bruhat, *Thermodynamique, cinquième édition entièrement remaniée par A. Kastler*, Masson et Cie éditeurs, 1962
3. J. Brochard, *Thermodynamique*, Masson et Cie éditeurs, 1963
4. R. B. Lindsay, *The Temperature Concept for Systems in Equilibrium*, in *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume Three*, Reinhold Publishing Corporation, 1962
5. *The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, traduction en anglais d'un texte issu des Procès-verbaux du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), texte autorisé par le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) et approuvé par le CIPM, 1990
6. C. M. Herzfeld, *The Thermodynamic Temperature Scale, Its definition and Realisation*, in *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume Three*, Reinhold Publishing Corporation, 1962
7. R. Fox, *The Caloric Theory of Gases : from Lavoisier to Regnault*, Oxford University Press, 1971
8. Sites internet :
 - Wikipedia, The Free Encyclopedia, [http : //en.wikipedia.org/](http://en.wikipedia.org/)
 - Lycée La Colinière, Nantes : *A propos de la température et de sa mesure*, [http : //www.ac-nantes.fr : 8080/peda/disc/scphy/dohtml/mpi/echelles/debut.htm](http://www.ac-nantes.fr:8080/peda/disc/scphy/dohtml/mpi/echelles/debut.htm)
 - Académie de Rennes, *La Température à travers les âges*, [http : //www.ac-rennes.fr/pedagogie/scphys/respeda/lyceegen/2nde/mpi_html/c_histem/his_temp.htm/](http://www.ac-rennes.fr/pedagogie/scphys/respeda/lyceegen/2nde/mpi_html/c_histem/his_temp.htm/)