

Le psychromètre :

l'instrument qui a défié la physique du 19^e siècle

Frédéric Restagno et François Boulogne (francois.boulogne@universite-paris-saclay.fr)

Laboratoire de Physique des Solides (Université Paris-Saclay et CNRS UMR 8502)

1 rue Nicolas Appert, Bâtiment 510, 91405 Orsay Cedex

La mesure de l'humidité de l'air a été un défi tout au long des siècles, mais, de nos jours, les capteurs électroniques sont largement utilisés.

Cette prédominance actuelle tend à reléguer au second plan un instrument qui a captivé les scientifiques pendant près d'un siècle et demi : le psychromètre.

L'hygrométrie au cours des âges

Au fil de l'histoire, la mesure de l'humidité de l'air a représenté un défi, et un large éventail de techniques ont été inventées, dont la liste exhaustive dépasse largement cet article. Les premières approches consistaient à employer des matériaux hygroscopiques, c'est-à-dire adsorbant ou libérant de l'eau pour atteindre un équilibre thermodynamique avec la teneur en eau de l'atmosphère, et à procéder à la mesure par pesée. Bien qu'il soit difficile d'attribuer l'invention de ce concept, on trouve plusieurs références à partir du quinzième siècle utilisant divers matériaux tels que la laine, le coton, les sels hygroscopiques et les éponges. Léonard de Vinci a illustré ce principe dans ses carnets, avec une balance à plateaux et du coton (*Codex Atlanticus*, 1478).

Au dix-septième siècle, des approches alternatives ont été réalisées en considérant les propriétés mécaniques des matériaux hygroscopiques. En effet, certains matériaux anisotropes

peuvent se dilater, s'enrouler ou se tordre en fonction de leur teneur en eau. Par exemple, Coniers utilisait l'expansion latérale du bois avec l'humidité, et Hooke a tiré profit de l'enroulement de fibres naturelles obtenues à partir de parois d'intestins d'animaux, de boyaux de chats, ou de plantes comme l'avoine et l'herbe à musc. Des appareils plus célèbres sont apparus à la fin du dix-huitième siècle. Ainsi, De Luc a proposé d'utiliser la dilatation de l'ivoire et, plus tard, des os de baleine. Enfin, la variation de longueur avec l'humidité de cheveux humains placés sous tension est le principe de l'hygromètre de Saussure, largement répandu. Ces hygromètres de De Luc et Saussure représentent un aboutissement de l'approche hygroscopique de l'époque, mais ont une précision limitée.

Les phénomènes hors équilibre : une nouvelle approche

Un nouvel élan apparaît avec la thermodynamique hors équilibre, dont fait partie le phénomène de condensation. Le principe est de

refroidir une surface en contact avec l'air, et dont on mesure la température. L'opérateur relève la température à laquelle la première goutte obtenue par condensation apparaît. Les premiers développements ont été faits dans les années 1660, où le principal défi à cette époque était le refroidissement. Daniell a utilisé en 1820 la vaporisation de l'éther, ce qui a donné naissance au célèbre hygromètre éponyme. Quelques décennies plus tard, le chimiste et physicien français Henri Victor Regnault [1] reconnaît la grande précision de cet appareil, mais aussi les difficultés à effectuer la mesure en raison de manipulations complexes, ce qui empêche une large utilisation en dehors des laboratoires scientifiques.

Le dix-neuvième siècle est également marqué par l'usage d'un autre phénomène hors équilibre, l'évaporation d'un liquide, qui est associée à un effet de refroidissement dû à l'enthalpie de vaporisation. L'utilisation de cette différence de température est appelée « psychrométrie » et s'est développée jusqu'au milieu du vingtième siècle.

“ En 1792, James Hutton, géologue et chimiste, observe qu’un thermomètre dont le bulbe est maintenu humide [...] indique une température plus basse qu’un thermomètre sec, ce qu’il met en relation avec l’humidité de l’atmosphère.”



Psychromètre à bulbe humide de l’armée américaine (1868). Le bulbe du thermomètre de gauche est recouvert d’un tissu plongeant dans un réservoir rempli d’eau. Ce bulbe est ainsi humidifié par capillarité, tandis que le thermomètre de droite a un bulbe sec. National Museum of American History [Libre de droit pour utilisation non commerciale. <https://americanhistory.si.edu/collections/rights-and-reproductions>]

La naissance du psychromètre

En 1792, James Hutton, géologue et chimiste, observe qu’un thermomètre dont le bulbe est maintenu humide (par exemple, avec un tissu imbibé d’eau) indique une température plus basse qu’un thermomètre sec, ce qu’il met en relation avec l’humidité de l’atmosphère [2, 3]. Une vingtaine d’années plus tard, John Leslie, intéressé par les mesures de chaleur et d’humidité, a étudié la différence de température entre les bulbes sec et humide. Étudiant par ailleurs les phénomènes liés à la capillarité, Leslie [4] a proposé un dispositif utilisant une ficelle afin d’alimenter constamment le bulbe humide en eau à partir d’un réservoir par succion capillaire. Il a rapporté des mesures relatives à la différence de température et au point de rosée, et a remarqué judicieusement que les températures mesurées dépendent de l’écoulement de l’air ambiant.

Assez rapidement, les physiciens cherchent à rationaliser le principe de cet instrument. D’ailleurs, on doit le nom « psychromètre » à E.F. August, qui propose en 1825 l’usage d’une

étymologie grecque construite sur les mots *psuchron* (froid) et *metron* (moyen de mesure). Ce terme est adopté par la communauté scientifique. La différence de température entre le bulbe sec et le bulbe humide étant reliée à la différence de pression de vapeur par un coefficient psychrométrique, le défi était de comprendre et de prédire ce coefficient.

Ivory [2], August [5], puis Apjohn [6] tentent d’élaborer des modèles pour lier la différence de température au point de rosée. Maxwell et Arnold qualifieront ces modèles de *théorie de la convection*, terminologie qui est différente du sens moderne. « Convection » signifie ici qu’un élément de volume d’air est transporté de manière *ad hoc* pour être mis en contact avec le bulbe humide, là où la transformation thermodynamique s’opère. Ces modèles permettent essentiellement de comprendre que la chaleur nécessaire à l’évaporation induit une baisse de température. Ainsi, le coefficient psychrométrique dépend de l’enthalpie de vaporisation de l’eau et de la capacité thermique de l’air.

Néanmoins, de nouvelles observations ont rapidement montré les limites de ces modèles. En effet, le physicien italien Giuseppe Belli publie en 1930 un *Corso Elementare Di Fisica Sperimentale*, dont un volume traite du transfert de chaleur. À partir de mesures minutieuses, Belli comprend que la différence de température dépend de la taille du bulbe humide, de la vitesse de l’air et des effets radiatifs, en plus de la teneur en eau présente dans l’air. Ce travail élucide les paramètres clés de l’instrument, mais pas encore les subtilités du mécanisme physique.

Inspiré par les travaux de Leslie, James Pollard Espy propose en 1834 de faire tourner le psychromètre pour imposer la vitesse de l’air, et de cette façon obtenir des mesures plus fiables [7]. C’est ainsi que le psychromètre à fronde, ressemblant à une crécelle, se développe.

En 1887, Assmann a relancé l’utilisation des psychromètres en météorologie, en leur apportant deux améliorations : protéger les bulbes avec un écran argenté pour minimiser les radiations, et imposer le flux d’air au moyen d’un ventilateur électrique aspirant l’air le long des thermomètres.

>>>

Un défi théorique

Bien que les paramètres régissant le psychromètre soient connus, il n'en reste pas moins que la description théorique a longtemps résisté à la physique.

Malgré ses importants efforts pour collecter des mesures dans diverses situations et pour améliorer la théorie de la convection d'August [5], Regnault a déclaré que les tentatives de rationalisation des mesures des psychromètres étaient vaines et que le psychromètre doit être considéré comme un instrument empirique, analogue à l'hygromètre de Saussure [1]. Regnault avait une préférence pour la mesure du point de rosée, bien que la manipulation soit plus délicate.

Une contribution majeure qui fera date dans l'étude de l'évaporation provient de James Clerk Maxwell dans un article intitulé "Diffusion" [8]. L'évaporation est décrite par un processus de diffusion de la vapeur dans l'air, qui s'oppose aux théories convectives établies jusqu'alors. Conscient des effets du rayonnement sur le psychromètre, Maxwell rédigea une théorie incluant un flux radiatif, la diffusion de la chaleur et de la masse. Néanmoins, ce modèle ne permet pas de rendre compte des effets de la vitesse de l'air.

Une description théorique plus juste du psychromètre est devenue possible au début du vingtième siècle. Maxwell a décrit le flux radiatif comme étant proportionnel à la surface et à la différence de température. De nos jours, nous savons cependant que cette dernière affirmation est incorrecte. En effet, l'équation décrivant le rayonnement d'un corps noir avec sa température T a été établie empiriquement par Josef Stefan en 1879 [9] et théoriquement par Ludwig Boltzmann en 1884, montrant que la puissance totale rayonnée est proportionnelle à T^4 .

En 1933, J. Howard Arnold publie un article intitulé "The theory of the psychrometer" [10], regroupant la théorie dite de conduction de Maxwell et la théorie de la convection d'August, ainsi que l'équation de Stefan-Boltzmann. Grâce aux travaux de Reynolds, il parvient à introduire le rôle de la vitesse de l'air. Pour appuyer ses prédictions, Arnold a réalisé des expériences dans une soufflerie non

seulement avec de l'eau, mais aussi avec du toluène, du chlorobenzène et du xylène.

La description moderne du transfert de chaleur et de masse sous flux d'air s'effectue avec la théorie de la couche limite. Cette dernière émergera lentement à partir de 1904 avec les travaux pionniers de Prandtl et Blasius, qui semblent être méconnus d'Arnold, sans doute parce que la théorie de la couche limite a mis du temps pour être reconnue par les pairs.

Pour résumer le principe, un psychromètre fonctionne en régime permanent, ce qui signifie que l'énergie nécessaire à la vaporisation du liquide est équilibrée à la fois par la diffusion thermique et par le rayonnement. En soufflant de l'air sur le psychromètre, on obtient une diminution de la différence de température jusqu'à une certaine vitesse caractéristique de l'air. En effet, l'évaporation et la diffusion thermique augmentent avec la vitesse de l'air en raison de l'apparition d'une couche limite à travers laquelle les transferts s'effectuent. Cependant, le flux d'air n'a aucun effet sur le processus radiatif. Ainsi, le flux d'air tend à diminuer la contribution relative du rayonnement dans le bilan énergétique, jusqu'au point où il peut être négligé. En outre, la conduction thermique et le flux d'évaporation varient de la même manière en fonction de la vitesse de l'air, et s'annulent au-dessus d'une vitesse caractéristique. Par conséquent, pour obtenir les mesures les plus fiables, les psychromètres sont ventilés de manière à ce que la différence de température devienne indépendante de la vitesse de l'air. Ainsi, la différence de température peut être reliée à l'humidité relative, et ce de manière indépendante de la vitesse de l'air.

La relation n'est cependant pas simple. D'un point de vue plus pragmatique, la lecture de tableaux ou le calcul d'équations empiriques étant peu pratique et chronophages, l'ingénieur américain Willis H. Carrier [11] a développé un diagramme psychrométrique pour mettre en relation les températures des bulbes sec et humide, et l'humidité relative (voir l'encadré, p. 31).

Une lente perte d'intérêt...

L'intérêt pour la description théorique des psychromètres a commencé à décroître au milieu du vingtième siècle, comme en témoigne le faible nombre de citations des travaux d'Arnold, alors qu'on venait enfin d'en rationaliser tous les principes physiques. Néanmoins, la physique sous-jacente au psychromètre présentait toujours un intérêt pour les recherches consacrées à l'évaporation des gouttes en suspension.

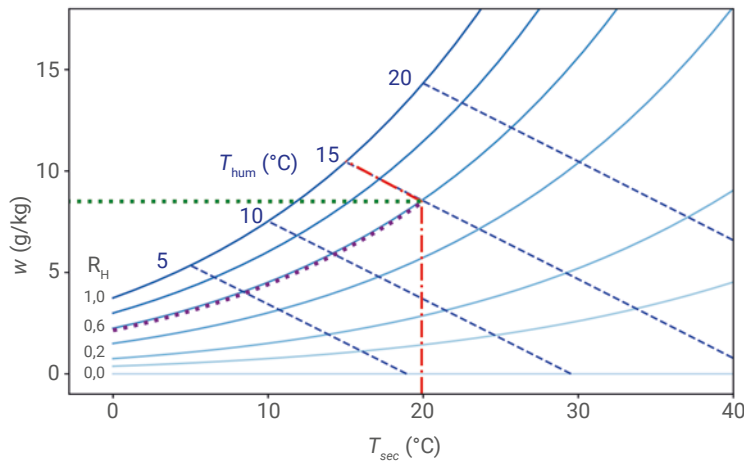
En 1938, N. Frössling a réalisé une analyse expérimentale et théorique poussée de l'évaporation de gouttes placées à l'extrémité d'une aiguille et plongées dans un flux d'air généré par un ventilateur [12]. Frössling a calculé les transferts de chaleur et de masse avec une approche moderne établie à partir de la couche limite de Prandtl, et a également considéré le rôle du rayonnement de Stefan-Boltzmann. Ce travail a mis en relation le taux d'évaporation, qui dépend de l'humidité relative, avec la température de la goutte ainsi que la vitesse de l'air. Bien que le psychromètre soit mentionné comme moyen de comparaison pour la température de la goutte mesurée, les références historiques sur le développement de la psychrométrie citées ci-dessus n'apparaissent pas dans l'ouvrage de Frössling.

À partir de la deuxième moitié du vingtième siècle, d'autres études sur l'évaporation des gouttes, notamment par Ranz et Marshall, Downing, Beard et Pruppacher, sont publiées sans liens avec le psychromètre, à l'exception de l'ouvrage de N.A. Fuchs sur l'évaporation des gouttes paru en 1959.

Le vingtième siècle est associé à l'émergence de l'électronique, et les capteurs d'humidité ont bénéficié de ces développements. En 1938, F.W. Dunmore invente un capteur à résistance composé d'un chlorure de lithium, élément hygroscopique. L'avantage revendiqué par Dunmore est une réponse plus rapide aux variations d'humidité, ce qui est notamment crucial pour les mesures météorologiques effectuées avec des ballons atmosphériques.

Aujourd'hui, les capteurs d'humidité utilisent différentes technologies, qui s'appuient sur la variation d'une

➔ DIAGRAMME DE CARRIER



E1. Diagramme de Carrier. Les courbes sont tracées pour des valeurs données de l'humidité relative R_H qui croisent les droites bleues en pointillés indiquant la température du bulbe humide. Ainsi, si la température ambiante T_{sec} est de 20 °C et que le bulbe humide est à 15 °C, l'intersection des deux lignes en tirets rouges conduit en un point permettant de lire une humidité relative R_H de 60 % et une humidité spécifique w de 8,5 g/kg.

Ce diagramme est utilisé pour mesurer l'humidité, mais aussi pour déterminer les variations physiques au cours des processus thermodynamiques. Carrier est ainsi reconnu comme le précurseur de l'ingénierie du traitement de l'air.

L'équation psychrométrique n'ayant pas de solution analytique, la conversion d'une mesure de températures sèche et humide en humidité relative est fastidieuse et a nécessité le recours à des tables.

Afin d'obtenir une résolution graphique de l'équation psychrométrique, l'ingénieur américain W.H. Carrier a mis au point en 1904 un diagramme représentant l'humidité spécifique w , c'est-à-dire la masse d'eau par unité de masse d'air, en fonction de la température du bulbe sec (fig. E1).

Ce diagramme permet également de visualiser les changements de propriétés de l'air lors de transformations isobares. Cet usage est utile à l'ingénierie du traitement de l'air, s'appliquant notamment aux domaines de l'agriculture, de l'agroalimentaire, de l'aéronautique et de la météorologie.

propriété de différents matériaux suite à l'absorption de vapeur. Les propriétés courantes sont la conductivité électrique, la permittivité diélectrique, l'indice de réfraction optique, la flexion mesurée par une piézorésistance, ou encore la variation de poids déterminée à partir du décalage de la fréquence de résonance. Cependant, les psychromètres ont encore leur place dans ces hautes technologies, puisqu'ils sont utilisés pour calibrer les capteurs électroniques et font office de standard pour l'Organisation météorologique mondiale.

À travers cette brève histoire du psychromètre, nous avons remarqué

que les paramètres pertinents, en particulier le rôle de la ventilation, ont été découverts très tôt à partir d'investigations expérimentales. Néanmoins, la compréhension du coefficient psychrométrique a été limitée pendant plus d'un siècle, en raison de l'absence de deux concepts majeurs : l'équation de Stefan-Boltzmann et la théorie de la couche limite. Aujourd'hui, le psychromètre possède un atout, celui d'être simple de conception et de fabrication, ainsi que d'être réparable et durable. Ceci en fait un instrument *low-tech* de choix qui pourrait le remettre sur le devant de la scène. ■

1• H.V. Regnault, « Études sur l'hygrométrie », *Ann. Chim. Phys.* **37** (1853) 257 ; *Études sur l'hygrométrie* (1845), Bachelier (Paris).

2• J. Ivory, "XVI. On the hygrometer by evaporation", *Philos. Mag.* **60** (1822) 81–88. <https://doi.org/10.1080/14786442208652797>

3• J. Playfair, "Biographical Account of the late Dr James Hutton, F. R. S. Edin", *Earth Environ. Sci. Trans. Royal Society of Edinburgh*, **88** (1997) 39–99. <https://doi.org/10.1017/S0263593300090039>

4• J. Leslie, *A Short Account of Experiments and Instruments, Depending on the Relations of Air to Heat and Moisture*, W. Blackwood (1813).

5• E.F. August, "Ueber die verdunstungskälte und deren anwendung auf hygrometrie", *Annalen der Physik* **81** (1825) 69–88.

6• J. Apjohn, "On the Theory of the Moist-Bulb Hygrometer", *The Transactions of the Royal Irish Academy* **17** (1831) 275-282.

7• J.P. Espy, "On the dew-point hygrometer in connexion with the web bulb thermometer", *Journal of the Franklin Institute* **17** (1834) 81–85. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(34\)90086-7](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(34)90086-7)

8• J.C. Maxwell, *Diffusion, collected scientific papers*, Encyclopedia Britannica, Cambridge (1877).

9• J. Stefan, "Ueber die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur, Sitzungsberichte der Kaiserlichen", *Akademie der Wissenschaften in Wien*, **79** (1879) 391–428.

10• J.H. Arnold, "The Theory of the Psychrometer. II. The Effect of Velocity", *J. Appl. Phys.* **4**, (1933) 334-340. <https://doi.org/10.1063/1.1745202>

11• W.H. Carrier, "Rational psychrometric formulae", *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* **33** (1911) 1005.

12• N. Frössling, "Ueber die Verdunstung fallender Tropfen", *Gerlands Beitr. Geophys.* **52** (1938) 170216.