

Construction et mise en œuvre d'un hygromètre à point de rosée

Michel CABANE, François RAVETTA et Jacques LEFRÈRE

LATMOS-IPSL/UPMC/CNRS

Université Pierre et Marie Curie (UPMC) - 75005 Paris

michel.cabane@latmos.ipsl.fr

francois.ravetta@latmos.ipsl.fr

jacques.lefrere@latmos.ipsl.fr

DANS UN PREMIER TEMPS, les enjeux attachés à la mesure du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère sont présentés, et la notion d'humidité relative est définie. La construction et la mise en œuvre d'un hygromètre à point de rosée sont ensuite détaillées, en vue de permettre sa duplication dans un établissement d'enseignement secondaire. Les performances de cet instrument sont alors analysées, et comparées à celle de la sonde d'humidité d'une station météorologique commerciale du réseau « Météo à l'École » déployé dans des collèges et lycées français.

1. MESURER LE CONTENU EN VAPEUR D'EAU DE L'ATMOSPHÈRE

1.1. L'eau dans l'atmosphère

L'eau existe sous ses trois états dans l'atmosphère : solide, liquide et vapeur. Sous forme de vapeur, sa pression partielle est extrêmement variable. Elle dépend fortement de l'altitude et de la température. Le contenu en vapeur d'eau est ainsi beaucoup plus élevé sous les Tropiques que dans les régions polaires. De la même façon, la stratosphère est beaucoup plus sèche que la troposphère. Pour une masse d'air donnée, ce contenu est ainsi lié à son histoire : déplacements horizontaux et verticaux, disparition de vapeur par condensation et formation de nuages ou précipitations, ou, au contraire, apparition par évaporation d'hydrométéores ou par passage au-dessus de surfaces d'eau condensée (lacs, mers). Mesurer le contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère, et analyser sa variabilité, est fondamental pour rendre compte des observations météorologiques, prévoir le temps à venir, ou étudier le climat. La vapeur d'eau est en effet le principal gaz responsable de l'effet de serre naturel sur Terre, et l'augmentation de son contenu contribue à amplifier l'effet de serre additionnel principalement dû aux émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Dans l'atmosphère, si des processus météorologiques conduisent l'atmosphère à la saturation en eau, la vapeur d'eau se condense sur des particules atmosphériques, les noyaux de condensation, et on voit apparaître des nuages formés d'eau liquide dans la basse atmosphère, de glace au-delà. Ces nuages contribuent eux-

mêmes fortement au bilan d'énergie de la planète, soit en réfléchissant le rayonnement solaire (effet parasol), soit en absorbant le rayonnement thermique tellurique (effet couverture). De plus, la prise en compte du transfert d'énergie latente lors de ce processus de condensation est nécessaire pour fermer le bilan d'énergie dans la troposphère, celle-ci n'étant pas à l'équilibre radiatif. La vapeur d'eau joue également un rôle important d'un point de vue chimique. La photodissociation de cette molécule libère des radicaux OH. Ceux-ci sont impliqués dans des cycles catalytiques de destruction de l'ozone stratosphérique. Ils contrôlent également l'essentiel de la chimie troposphérique, par là même le temps de vie de gaz à effet de serre comme le méthane⁽¹⁾.

1.2. Quantification du contenu en vapeur d'eau atmosphérique

Il existe de multiples manières de caractériser le contenu en vapeur d'eau dans l'atmosphère. Le choix d'une technique de mesure dépendra de l'objectif scientifique poursuivi et conditionnera celui d'une grandeur associée : concentration et rapport de mélange volumique ou massique, pression partielle, contenu intégré sur la verticale, température du point de rosée, humidité relative [5]. Nous nous intéressons ici à l'humidité relative, grandeur particulièrement adaptée pour diagnostiquer la formation de nuages.

Notons e_a la pression partielle de vapeur d'eau de l'air ambiant. Cette pression partielle ne peut augmenter indéfiniment. Pour une température donnée, $T_{\text{éq}}$, en présence d'une surface plane d'eau pure, elle atteint une limite. On dit alors que l'air est saturé en eau à cette température, et on définit la quantité e_s , pression de vapeur saturante. Tout excédent de vapeur d'eau sera alors pris en charge par la phase liquide. La saturation peut également se produire lors du refroidissement d'une surface solide en présence d'air humide, au moment où la surface acquiert la température $T_{\text{éq}}$. Tout refroidissement ultérieur de l'air nécessite alors la perte par la phase gaz d'une certaine quantité de molécules d'eau. Une surface non poreuse se couvre alors d'une pellicule d'eau condensée, sous forme de gouttelettes de rosée ou de cristaux de glace⁽²⁾. Cela explique la formation de rosée matinale, suite au refroidissement radiatif nocturne. C'est pourquoi la température d'équilibre $T_{\text{éq}}$ est aussi appelée température de rosée. Par la suite, nous la noterons T_d (l'indice d est pour *dew*, rosée en anglais).

Dans le cas d'un équilibre entre phase vapeur et phase liquide, les quantités e_s et

(1) <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>

(2) En fait, si la surface solide est idéalement propre, le processus de changement de phase n'apparaît que beaucoup plus tard (nucléation homogène). Ici, il faut que la surface porte des germes, molécules d'eau adsorbées, poussières..., ce processus de nucléation hétérogène est le plus commun dans les environnements classiques.

T_d sont reliées par la formule de Clapeyron :

$$\frac{de_s}{dT_d} = L_v \times \frac{1}{T_d \Delta V}, \quad (1)$$

où L_v désigne la chaleur latente molaire de vaporisation de l'eau, et ΔV représente la différence des volumes molaires entre phases gazeuse et liquide. Cette équation peut être intégrée pour donner $e_s = f(T_d)$. On trouvera dans Arden L. Buck [2] des solutions satisfaisant l'intervalle météorologique (-80 °C, $+50$ °C).

Dans la gamme des températures troposphériques habituelles (-20 °C, $+40$ °C), on peut alléger les calculs en négligeant le volume molaire d'eau liquide par rapport au volume molaire gazeux, et en admettant que L_v est indépendant de la température d'équilibre T_d . On obtient alors la formule simplifiée :

$$e_s(T_d) \approx e_s^{ref} \times \exp - A \cdot \left(\frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_d^{ref}} \right) \quad (2)$$

dont les paramètres peuvent être obtenus par comparaison avec les résultats de la formule développée [2].

Nous obtenons $A = 5411$ K, $e_s^{ref} = 31,7$ hPa, $T_d^{ref} = 298$ K pour un ajustement avec moins de 1 % d'erreur. Pour des températures inférieures à 0 °C, L_v doit être remplacée dans (1) par L_s , chaleur latente de sublimation. Cependant, dans le cas des températures troposphériques la modification est faible, et la formule (2) pourra encore être appliquée.

Température T_d (°C)	- 20	- 10	0	10	20	30	40
e_s (hPa) Réf. : Buck [2]	1,26	2,87	6,13	12,28	23,48	42,63	74,16
e_s (hPa) Réf. : équation (2)	1,25	2,83	6,08	12,24	23,49	43,18	76,35

Tableau 1 - e_s , pression de vapeur saturante au-dessus de l'eau liquide, en fonction de la température de rosée T_d . Valeur théorique [2] et approximation donnée par l'équation (2).

Dans des conditions ambiantes données de pression partielle de vapeur d'eau et de température (e_a , T_a), on définit l'humidité relative de l'air ambiant, notée H_R , comme le rapport :

$$H_R = \frac{e_a}{e_s(T_a)}. \quad (3)$$

Cette quantité H_R varie entre 0 % (air idéalement sec) et 100 % (air saturé en eau). Elle joue un rôle fondamental dans la physique des nuages, comme dans la vie de tous les jours. En mesurant l'état de sécheresse ou d'humidité de l'air, elle conditionne aussi bien la formation de précipitations et l'évaporation des surfaces liquides que les gènes

respiratoires et la fanaison des plantes. H_R , grandeur relative, est une fonction de la température de l'air, de sorte que, pour un même contenu en vapeur d'eau, représenté par e_a , l'humidité H_R sera faible pour un air chaud, élevée pour un air froid.

On peut accéder à H_R par différentes méthodes. À partir de la mesure, dans l'air ambiant, de e_a et T_a , on peut obtenir le couple (e_a, e_s) et donc obtenir H_R , mais les faibles valeurs de e_a rendent sa mesure malaisée. Pour des mesures plus directes, on utilise l'interaction de la vapeur d'eau avec différents substrats hydrophiles. S'il s'agit de cheveux ou de serpentins en carton, ce seront les hygromètres élémentaires du commerce ; si l'on permet à l'humidité de faire varier les caractéristiques électriques d'un substrat, ce seront les hygromètres résistifs ou capacitifs, plus évolués. Dans tous ces cas, la mesure n'est pas toujours très précise ; de plus, l'eau adsorbée peut ne pas être pleinement restituée lorsque l'air se dessèche. L'instrument dérive alors avec le temps.

Nous présentons ici une version élémentaire d'un type d'hygromètre plus fiable et plus précis dans lequel on refroidit une plaque métallique tout en mesurant sa température. La température T_d est le seuil de formation ou de destruction de microgouttelettes d'eau facilement observables à la surface de cette plaque. La température de l'air ambiant, T_a , et celle de la surface froide, T_d , étant mesurées, on accède alors facilement à l'humidité relative de l'air, H_R . En effet, à partir de la mesure T_a on calcule la valeur de la pression de vapeur saturante $e_s(T_a)$ alors que celle de la pression de vapeur de l'air ambiant, $e(T_a)$, s'obtient à partir de la mesure de T_d . D'un point de vue physique, la saturation de l'air est obtenue par refroidissement isobare. Au cours de cette transformation, la fraction molaire en eau est conservée. La pression partielle en eau du système est donc la même dans son état initial (e_a, T_a) et dans son état final (e_s, T_d) : $e_a = e_s(T_d)$, et l'équation (3) se reformule :

$$H_R = \frac{e_a}{e_s(T_a)} = \frac{e_s(T_d)}{e_s(T_a)}. \quad (4)$$

2. RÉALISATION ET UTILISATION DE L'HYGROMÈTRE À POINT DE ROSÉE

2.1. Construction de l'hygromètre

2.1.1. Principe de fonctionnement

L'hygromètre est constitué par un support métallique placé dans l'air ambiant à la température T_a , sur lequel est fixée une pompe à chaleur statique, ici un module à effet Peltier. On refroidit ainsi une plaque métallique polie, et la pompe dissipe la chaleur prélevée dans un thermostat *via* le support qui fait office de radiateur. La température ambiante T_a et la température de la plaque froide T_f sont mesurées par des capteurs passifs, ici des thermistances. Dans la version présentée, l'opérateur fait varier la température de la plaque froide. Il accède aux valeurs des températures *via* la mesure de la résistance des capteurs.

Si l'on diminue la température de la plaque froide à partir de la température ambiante, T_a , la condensation apparaît sur cette plaque lorsque $T_F = T_d$. Elle se manifeste par la formation d'une buée bien visible. L'humidité relative est alors calculable à partir de (2) et (4). Principal ajout des hygromètres du commerce, la détection par l'observateur est remplacée par une détection optique instrumentale et un asservissement permanent autour de l'apparition de rosée. Ce développement n'est pas présenté ici.

2.1.2. Refroidissement par effet Peltier

En 1821, Thomas Seebeck observa qu'en l'absence de générateur, lorsque les extrémités d'un conducteur sont portées à des températures différentes et sont reliées à un voltmètre, il apparaît une faible différence de potentiel. Un peu plus tard (1834), Jean-Charles Peltier appliquant un générateur électrique à la boucle électrique décrite ci-dessus, isotherme initialement, montre que le passage d'un courant électrique d'intensité I dans le matériau maintenant connecté à un générateur, conduit à l'apparition d'un déséquilibre thermique entre ses extrémités. Ces deux effets relèvent de la thermoélectricité : les niveaux d'énergie des électrons sont différents entre les matériaux qui sont en jonction [1]. Dans l'effet Seebeck, on peut donner une explication simple en considérant que les porteurs de charge, dans le métal, se comportent comme un gaz et diffusent de la zone chaude vers la zone froide ; lors de l'effet Peltier, qui peut être considéré comme le symétrique de l'effet Seebeck, les électrons, lors de leur mouvement d'une jonction à l'autre sous l'effet de la tension appliquée, déplacent de l'énergie thermique. La différence de température qui apparaît lors de l'expérience Peltier doit être modérée par l'effet Joule dû au passage du courant I dans le conducteur et par la tendance à l'uniformisation des températures due à la conductivité thermique des matériaux [3]. Dans l'annexe, on trouvera ce bilan thermique appliqué au module Peltier dans son ensemble (Eq. A2). L'effet Peltier s'observe de façon beaucoup plus marquée pour les semi-conducteurs SCn (conduction par les électrons), en raison du fait que les SCn ont des coefficients thermoélectriques (coefficients de Seebeck, Eq. A2) bien supérieurs à celui des métaux conducteurs. Dans le cas des SCp (conduction par les trous positifs), le rendement est du même ordre de grandeur que celui des SCn, mais le sens de refroidissement est, évidemment, inversé.

Au xx^e siècle, cette méthode de refroidissement thermoélectrique s'est imposée dans de nombreux cas, pour sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre.

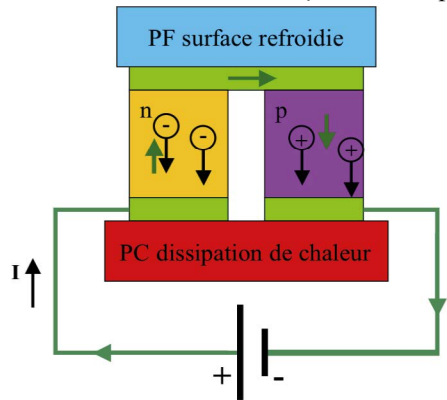


Figure 1 - Schéma de principe du fonctionnement d'un module à effet Peltier.

Le montage de la figure 1 (cf. page précédente) illustre le procédé.

On voit sur cette figure l'assemblage et l'alimentation en courant d'un semi-conducteur de type n et d'un semi-conducteur de type p , placés en jonction entre deux plaques conductrices ; le courant électrique I (flèches vertes) parcourt la chaîne générateur - semi-conducteurs. Le sens de déplacement des électrons dans le semi-conducteur SC n est opposé, par définition, au sens du courant, alors que dans SC p courant électrique et déplacement des trous positifs sont de même sens. Dans les deux cas, le flux de porteurs de charge est dirigé de la plaque supérieure PF vers la plaque inférieure PC : on a donc, aussi bien pour SC n que pour SC p , transfert d'énergie thermique de PF vers PC, et ainsi refroidissement de PF par rapport à PC.

Le montage de la figure 1 constitue un module à effet Peltier ou thermo-electrical cooler (TEC). Il existe, dans le commerce, des modules à effet Peltier à plusieurs étages, avec refroidissement de plaques intermédiaires (cf. figure 2). Si la plaque PC est reliée à un thermostat, l'atmosphère par exemple, le TEC fonctionnera dans des conditions optimales et on aura constitué une pompe à chaleur statique. Les usages des TEC sont multiples en refroidissement pour l'électronique, l'informatique ou le ménager (glacières).

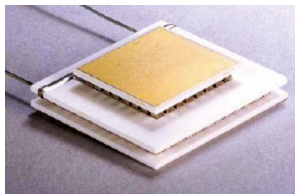


Figure 2 - Module Peltier à deux étages, NL2063T (Marlow), utilisé pour la réalisation de l'hygromètre. La face supérieure (dorée) est la face froide, la face inférieure est la face chaude ; les fils de connexion sont visibles dans le quart supérieur gauche.

2.1.3. Mesure de la température

Les métaux et les semi-conducteurs ont une résistivité qui dépend de la température, et sont utilisés pour construire des thermistances, capteurs passifs de faible inertie thermique, de faible dimension et d'usage facile. Nous avons choisi d'utiliser des thermistances à base d'oxydes métalliques semi-conducteurs dont la particularité est d'avoir une caractéristique $R = f(T)$ de pente négative, d'où leur nom de thermistances CTN (Coefficient de température négatif). Ces thermistances, d'usage simple, peuvent être de petite dimension (moins de 1 mm), ce qui permet une mesure au plus près de la zone à étudier.

La relation $R = f(T)$ peut être modélisée par une formule paramétrée, où les

paramètres T_0 , R_0 , β sont donnés par le fournisseur :

$$R(T) \approx R_0 \times e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}. \quad (5)$$

2.1.4. Construction de l'hygromètre

L'hygromètre est présenté sur la figure 3. Un tube métallique droit à section rectangulaire (10 cm × 6 cm × 4 cm) fixé sur une plaque support métallique constitue le radiateur, un petit ventilateur V_1 , du type de ceux habituellement utilisés pour le refroidissement de composants électroniques, apporte en permanence de l'air ambiant dans ce tube pour aider à l'extraction de chaleur. Une thermistance Θ_1 placée dans le flux d'air en aval de V_1 , permet d'obtenir la température ambiante T_a , via la mesure de sa résistance électrique (formule 5).

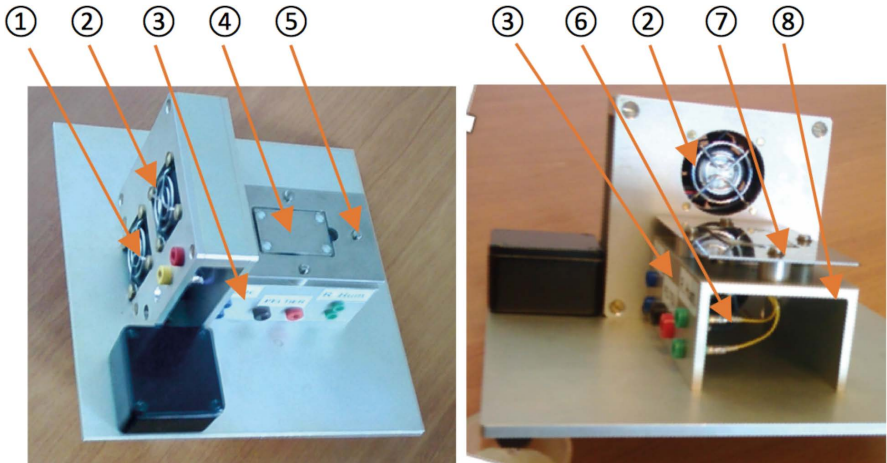


Figure 3 - Vues de l'hygromètre (le montage électrique est présenté sur la figure 4).

- ① Ventilateur V_1 : l'air ambiant, à T_a , circule dans le tube ⑧, ce ventilateur n'est pas visible sur la photographie de droite.
- ② Ventilateur V_2 : l'air ambiant, à T_a , est soufflé au-dessus des plaques ④ et ⑤, coplanaires.
- ③ Façade connectique (TEC et thermistances) du tube ⑧.
- ④ Plaque « froide » P_F , polie, en contact thermique avec la face « froide » du TEC Peltier (cf. figure 2) ; la face « chaude » est en contact avec le tube ⑧ ; les contacts thermiques PF-TEC et TEC-tube sont assurés par l'intermédiaire de vis de plaquage isolantes entre ④ et ⑧.
- ⑤ Plaque P_{ref} , polie, référence visuelle à $T \approx T_a$, coplanaire à ④, fixée sur ⑧ par des vis métalliques et des entretoises (voir ⑦).
- ⑥ Connectique de la thermistance « froide » Θ_2 , la connectique de la thermistance « chaude » Θ_1 n'est pas visible ici.
- ⑦ Entretoise (épaisseur du TEC) entre ⑤ et ⑧.
- ⑧ Tube à section rectangulaire monté sur la plaque support. Ces deux éléments constituent un radiateur à $T \approx T_a$.

Le TEC-Peltier est fixé sur une face du tube. Il est pris en sandwich entre cette face et une plaque métallique, P_F , en contact thermique avec sa partie supérieure, froide (on utilise vis et colonnettes en nylon, non-conducteur de la chaleur, entre P_F et le tube).

Cette plaque est polie afin de mieux observer la condensation de l'eau à sa surface. Sa température, notée T_F , est variable. La partie inférieure du TEC, la plus chaude, est à la température du radiateur, proche de T_a , température de l'air ambiant. La plaque P_F , est enchâssée dans une plaque métallique polie P_{ref} , dont elle est séparée thermiquement par un évidement. Fixée sur le tube par des vis et colonnettes métalliques conductrices de la chaleur, P_{ref} est aussi à la température du radiateur.

Lorsque le TEC est refroidi, l'observateur a en permanence dans son champ de vision la plaque de référence P_{ref} , à température proche de T_a , réfléchissante de la lumière, et la plaque P_F , également réfléchissante, mais susceptible de se couvrir de condensation. Il peut ainsi mieux apprécier le moment où P_F , embuée, cesse de se comporter comme un miroir. Un canal est pratiqué dans l'épaisseur de P_F , et une thermistance θ_2 est glissée dans celui-ci, sa partie sensible étant amenée au plus près de la zone froide. On peut alors déduire la valeur de T_F de la mesure de la résistance de θ_2 .

Un ventilateur V_2 , de même type que V_1 , amène l'air ambiant au-dessus de P_F , et minimise les perturbations apportées par les étudiants, placés en aval des flux d'air apportés par V_1 et V_2 . Ces deux ventilateurs sont connectés à une alimentation A_V .

Le refroidisseur utilisé ici est un TEC à deux étages (Marlow NL2063T)⁽³⁾ connecté à une alimentation stabilisée A_p susceptible de fournir une intensité I maximale de 5 A sous une tension U de 5 V en continu (cf. figure 4). Les thermistances θ_1 et θ_2 sont des CTN (Siemens B57164 K 164)⁽⁴⁾ caractérisées par l'équation (5) avec les paramètres $R_0 = 100 \text{ k}\Omega$, $\beta = 4540 \text{ K}$ et $T_0 = 298 \text{ K}$.

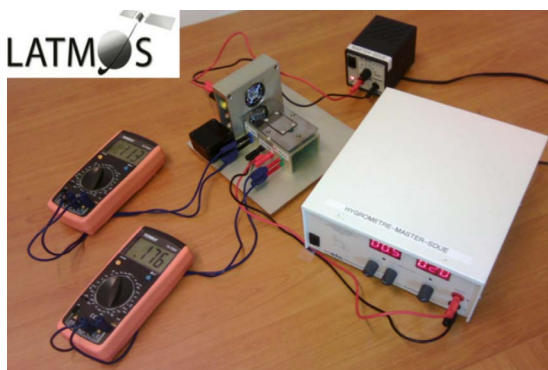


Figure 4 - Mise en place du TP « hygromètre ». Une alimentation stabilisée courant/tension ajustable alimente le module Peltier. Les ventilateurs V_1 et V_2 sont alimentés simultanément par une autre source. Les résistances des thermistances θ_1 et θ_2 sont mesurées à l'aide de multimètres (position ohmmètre).

(3) http://www.datasheetlib.com/datasheet/1136136/nl2063t-03ab_marlow-industries.html

(4) <http://www.voti.nl/docs/ntc-01.pdf>

2.2. Déroulé d'une expérience

L'opérateur fait varier le couple (I, U) de l'alimentation A_p du TEC (module Peltier). Il accède aux valeurs des températures T_F (plaque froide) et T_a (air ambiant), par l'intermédiaire des thermistances Θ_1 et Θ_2 , puis calcule le rapport :

$$G = \frac{e_s(T_F)}{e_s(T_a)} \quad (6)$$

entre les pressions de vapeur saturante à la température du TEC et à la température ambiante obtenues à l'aide de (2). Lorsque la température du TEC correspond à l'apparition de buée sur la plaque froide, on a $T_F = T_d$ température de rosée, et $G = H_R$, d'après la relation (4).

Dans le tableau 2, pour une série de mesures, on a reporté :

- ◆ les paramètres électriques du TEC (courant I et tension U) ;
- ◆ la température ambiante (T_a) et la température atteinte par la face froide (T_F) déduites des mesures sur Θ_1 et Θ_2 ;
- ◆ le rapport G (Eq. (6)) ;
- ◆ et le résultat de l'observation visuelle de la plaque P_F .

I (ampère)	U (volt)	T_a (°C)	T_F (°C)	G (%)	État de surface de P_F
0,00	0,0	19,7	19,8	99,1	
0,15	0,3	19,9	15,6	75,8	
0,25	0,6	19,4	12,5	64,1	
0,45	1,1	19,7	8,3	47,4	
0,55	1,2	19,7	6,2	41,2	
0,57	1,3	19,9	4,6	40,0	
0,60 = I_d	1,4 = U_d	19,9	5,5 = T_d	38,5 = H_R	Rosée
0,63	1,4	19,9	5,0	37,2	Idem
0,65	1,5	19,9	4,9	36,7	Idem
0,70	1,6	20,1	4,3	34,9	Idem
0,80	1,8	20,2	3,2	32,0	Idem
0,90	1,9	20,2	2,0	29,7	Idem

Tableau 2 - Expérience en air intérieur (LATMOS, UPMC, Paris le 15 février 2015, 09 h à 11 h) ; la température de rosée observée est $T_d \approx 5,5^\circ\text{C}$, soit $H_R \approx 38,5\%$. Un balayage préalable, de $I = 0,25$ à $0,65$ mA, avait permis de placer le point de rosée entre $I = 0,55$ A et $I = 0,65$ A.

La valeur de la tension électrique figure pour mémoire, la puissance $P = UI$ tra-

versant le TEC étant ajustée à l'aide du courant. En effet, en raison de la faible résistance électrique du TEC, de l'ordre de $2\ \Omega$, il est préférable de contrôler I , dont la variation en ampères est plus marquée. Le tableau ne comporte pas tous les points expérimentaux. Lorsque l'opérateur voit la rosée apparaître sur la plaque froide, on se trouve au point de rosée, et $G_{\text{rosée}} = H_R$ (Eqs. (4) et (6)). On voit, ici, que l'humidité relative calculée se trouve dans l'intervalle $37,2 < H_R < 40,0\ \%$.

3. PERFORMANCES DE L'INSTRUMENT

3.1. Incertitude des mesures

Les incertitudes sur la valeur de l'humidité relative H_R sont de trois origines, nous allons les estimer pour des températures ambiantes T_a comprises entre $5\ ^\circ\text{C}$ et $30\ ^\circ\text{C}$ et pour des valeurs plausibles, de $20\ \%$ à $90\ \%$, de l'humidité relative.

◆ *Incertitudes sur le calcul des températures T_d et T_a*

Les paramètres des thermistances intervenant dans (5) sont donnés par le constructeur avec une incertitude relative $\frac{\Delta R_0}{R_0} = 1\ \%$ et $\frac{\Delta\beta}{\beta} = 1\ \%$. L'incertitude relative sur la mesure de leur résistance $\frac{\Delta R}{R}$ est estimée à environ $1\ \%$. L'incertitude sur les températures est alors estimée à l'aide de la formule (5). On en déduit l'incertitude sur H_R à l'aide des formules (2) et (4). L'incertitude absolue ΔH_R , grandeur exprimée en pour cent, qui en découle est d'environ $2\ \%$.

◆ *Validité de la formule simplifiée (2) utilisée pour obtenir $e_s(T_d)$ et $e_s(T_a)$*

Si l'on calcule H_R à l'aide de (3) en utilisant soit l'équation (2) soit des valeurs tabulées, l'incertitude absolue ΔH_R est $\Delta H_R \approx 1\ \%$.

◆ *Appréciation de l'incertitude lors de la détermination de T_d due à l'erreur commise par l'opérateur sur le seuil (I_d, U_d) d'apparition de la rosée*

La visibilité de ce phénomène n'est pas réellement instantanée : il faut qu'une quantité suffisante d'air soit saturée pour que l'eau se condense sur la plaque froide et que des gouttelettes grossissent jusqu'à former une buée visible. Inversement, quand on augmente la température de la plaque couverte de rosée la buée s'évapore. Cette procédure conduit à une possibilité d'erreur due à un pas de variation de température trop important, à un temps d'attente de la mise à l'équilibre trop court, ou à la non-détection visible d'une buée existante.

En annexe, on montre que H_R suit une loi approximative $H_R \approx \exp\left(-\frac{I_d}{I_0}\right)$ où les paramètres du montage conduisent à $I_0 \approx 660\ \text{mA}$.

L'incertitude absolue sur H_R en fonction de l'incertitude expérimentale sur I_d est donc de la forme : $\Delta H_R \approx H_R \frac{\Delta I_d}{I_0}$. Les résultats de multiples mesures nous conduisent

à estimer que l'incertitude sur l'apparition de rosée peut se traduire par $\Delta I_d \approx 0,03 \text{ A}$. On en déduit une incertitude absolue sur H_R d'environ 2 %, pour une humidité relative de 40 %, et de 5 %, pour une humidité relative de 90 %.

L'incertitude absolue totale sur la valeur de l'humidité relative, grandeur exprimée en pour cent, fait intervenir les trois sources ci-dessus. Elle varie donc de $\Delta H_R \approx 5 \%$ aux faibles humidités relatives à $\Delta H_R \approx 8 \%$ aux humidités relatives élevées.

L'incertitude absolue estimée pour cet hygromètre est comparable à celle des différents types de capteurs existant dans le commerce, l'industrie, ou la recherche. Les hygromètres à variation mécanique (allongement par exemple) d'un matériau hydrophile ont une précision de l'ordre de 5 à 10 % ; lorsque le matériau hydrophile voit varier ses propriétés électriques (résistance, capacité), la précision est de l'ordre de 3 à 5 %. Enfin, les hygromètres à point de rosée évolués (détection optique, asservissements) ont une précision souvent meilleure que le pour cent.

3.2. Exactitude et interprétation des mesures d'humidité relative

Afin d'estimer l'exactitude des mesures réalisées avec notre appareil, une comparaison a été conduite avec la mesure de l'humidité relative d'une des stations météorologiques commerciales Davis VP2⁽⁵⁾ qui équipent désormais les collèges et lycées du programme *Météo à l'École*, brièvement décrit dans la dernière section de cet article. La tour centrale de l'Université Pierre et Marie Curie, dite Tour Zamansky, est en effet équipée à son sommet d'une telle station. Lors de la journée du 4 novembre 2015, l'hygromètre a donc été déployé au voisinage direct de cette station météorologique. Trois mesures d'humidité relative à l'aide de l'hygromètre à point de rosée ont été réalisées, vers 10 h, 14 h et 17 h 30, la station météorologique mesurant pour sa part l'humidité relative et la température ambiante en continu. La mesure d'humidité relative de la station météorologique est faite à l'aide d'un capteur capacitif avec une précision de 4 %⁽⁶⁾. La mesure de la température ambiante est réalisée à l'aide d'une thermistance.

Sur la figure 5 (cf. page ci-après), l'accord entre les deux mesures d'humidité relative est bon. Les écarts entre les deux instruments sont compatibles avec les incertitudes des mesures, et les tendances observées au cours de la journée sont les mêmes, avec un minimum d'humidité relative observé en début d'après-midi. Il convient toutefois de rester prudent s'agissant de l'interprétation de cette variabilité journalière. En effet, en dehors de tout transport horizontal notable des masses d'air, celle-ci est principalement pilotée par la variation de température locale, maximale vers 15 h. Quand le contenu absolu en eau (rapport massique de mélange par exemple) varie peu, les mesures d'un

(5) <http://www.davisnet.com/weather/products/vantage-pro-professional-weather-stations.asp>

(6) http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6152_62_53_63_SS.pdf

hygromètre à point de rosée reflètent avant tout les variations de la pression de vapeur saturante e_s , et donc de la température. L'expression analytique de e_s , formule (2), explique alors l'anticorrélation évidente entre les deux courbes continues (température ambiante et humidité relative).

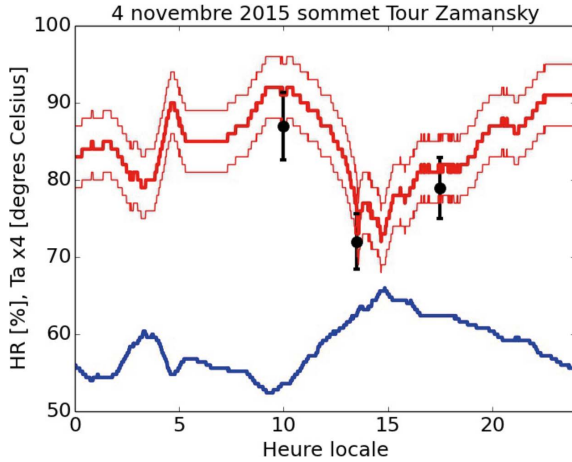


Figure 5 - Mesures avec la station météorologique Davis VP2, au sommet de la Tour Zamansky, de la température ambiante T_a (courbe bleue, valeurs multipliées par 4), de l'humidité relative H_R (courbe rouge épaisse) et de son incertitude (courbes rouges fines). Les trois mesures de l'humidité relative obtenues avec l'hygromètre à point de rosée sont en noir (gros points avec leurs barres d'incertitude).

On note enfin que l'hygromètre à point de rosée semble mesurer des valeurs d'humidité relative plus faibles que l'instrument commercial ; en l'absence d'une mesure de référence absolue et de mesures systématiques, et compte tenu des conditions expérimentales (atmosphère non contrôlée), ce possible biais ne s'explique pas simplement.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'hygromètre présenté ici a été réalisé pour les travaux pratiques du module de Physique et microphysique des nuages, en première année du master Océan, atmosphère, climat, observations spatiales de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI). Il est facile d'utilisation et déplaçable. Il peut être mis en œuvre par les étudiants, dans une salle de TP, avec une faible perturbation due à leur présence. Il mesure en un temps raisonnable (quinze minutes) une valeur de l'humidité relative H_R avec une incertitude absolue de 5 à 8 %. Outre la mesure de H_R , la procédure d'utilisation de cet hygromètre permet de faire mieux comprendre les notions de pression partielle, de pression saturante et de température de rosée ; la présence de semi-conducteurs (refroidisseur

Peltier, thermistance) constitue, de plus, une illustration du rôle des semi-conducteurs dans la vie courante (hors électronique ou informatique).

Compte tenu des programmes officiels, la mesure de l'humidité relative trouve aussi sa place dans l'enseignement secondaire. La construction de cet hygromètre permet par ailleurs aux élèves d'accéder à une mesure directe d'une grandeur fréquemment rencontrée dans la vie courante. Elle complète utilement le déploiement de stations météorologiques dans les collèges et lycées, par exemple au travers de l'opération *Météo à l'École* du dispositif ministériel *Sciences à l'École*⁽⁷⁾. Cette opération consiste à animer un réseau de stations météorologiques à vocation éducative. Implantées dans des établissements d'enseignement secondaire et réparties sur l'ensemble du territoire français, une cinquantaine de stations mesurent actuellement des paramètres tels que la température, les précipitations, la pression atmosphérique, la direction et la vitesse du vent, ou l'intensité du rayonnement solaire. Les données enregistrées par ces stations sont en libre accès sur le site internet dédié à l'opération⁽⁸⁾. Cette base de données météorologiques, régulièrement alimentée, constitue un excellent support à la mise en place d'activités pédagogiques variées : exploitation du réseau pour le suivi d'une perturbation, réalisation et qualification d'un capteur météorologique, analyse et interprétation de la variabilité locale du vent, influence de la couverture nuageuse sur le rayonnement disponible par exemple. En 2014-2015, plus de deux mille cinq cents élèves étaient impliqués dans les projets de l'opération *Météo à l'École*.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'équipe technique du LATMOS, en particulier Pierre Gilbert, pour l'aide apportée lors de la construction de l'hygromètre.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] J.-P. Barrat, « Effet Volta, effet Peltier », *Bull. Un. Phys.*, vol. 82, n° 705, p. 779-785, juin 1988.
- [2] A. L. Buck, "New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor", *J. Appl. Meteor.*, n° 20, p. 1527-1532, 1981.
http://www.public.iastate.edu/~bkh/teaching/505/arden_buck_sat.pdf
- [3] A. Domsps, « Étude d'un thermoélément à effet Peltier », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 106, n° 941, p. 217-229, février 2012.

(7) <http://www.sciencesalecole.org/>

(8) <http://www.meteoalecole.org>

- [4] Z. Luo, "A simple method to estimate the physical characteristics of a thermoelectric cooler from vendor datasheets", *Electronics Cooling*, n° 14, p. 22-27, 2008.
<http://www.electronics-cooling.com/2008/08/a-simple-method-to-estimate-the-physical-characteristics-of-a-thermoelectric-cooler-from-vendor-datasheets/>
- [5] S. Malardel, *Fondamentaux de météorologie*, Cépaduès-Éditions, 2009.

Annexe

Calcul de l'incertitude absolue expérimentale

Le calcul suivant approxime le lien entre l'erreur sur la valeur de l'humidité relative $\Delta G_{rosée} = \Delta H_R$ et l'erreur ΔI_d d'estimation du courant traversant le TEC à la rosée. L'équation (2), appliquée à T_F c'est-à-dire $e_s(T_F)$, peut être écrite en faisant apparaître la température ambiante T_a : $e_s(T_F) = e_s^{ref} \times \exp\left(-A \cdot \left(\frac{T_{ref} - T_a + T_a - T_F}{T_F T_{ref}}\right)\right)$, c'est-à-dire :

$$e_s(T_F) = e_s^{ref} \times \exp - A \cdot \left(\frac{T_{ref} - T_a}{T_F T_{ref}}\right) \times \exp\left(-A \cdot \frac{T_a - T_F}{T_F T_{ref}}\right).$$

En notant $\delta T = T_a - T_F$ le refroidissement de P_F , et en remarquant que les températures T_F , T_a et T_{ref} sont voisines, le rapport G , exprimé par (6) peut alors s'écrire :

$$G(T_F, T_a) \approx \exp\left(-A \cdot \left(\frac{\delta T}{T_{ref}^2}\right)\right). \quad (A1)$$

Le module Peltier peut être caractérisé par R , la résistance de son circuit électrique, par K_C , la conductivité thermique des matériaux entre P_C et P_F , et par S_{pn} , différence des coefficients de Seebeck des SC_n et SC_p qui le composent et qui définit le transport d'énergie thermique par effet thermoélectrique entre P_F et P_C .

La différence de température δT entre les plaques est alors reliée à la charge thermique Q (puissance extraite de la plaque froide) et à l'intensité du courant I qui traverse le Peltier par l'équation de bilan thermique [4] :

$$Q = S_{pn} \cdot I \cdot T_F - K_c \delta T - \frac{1}{2} RI^2. \quad (A2)$$

Dans cette équation, $S_{pn} \cdot I \cdot T_F$ représente la chaleur prélevée à P_F par les porteurs de charge électrique, $K_c \delta T$ représente la chaleur transmise de la plaque P_C à la plaque P_F par conductivité thermique, et $\frac{1}{2} RI^2$ représente la puissance Joule créée dans SC_n et SC_p et transmise à la plaque P_F (la puissance Joule totale RI^2 est supposée être répartie à parts égales entre P_F et P_C).

Dans les conditions de l'expérience, la charge thermique Q est négligeable, en effet l'air est peu conducteur de la chaleur et la quantité d'eau recueillie est faible. De plus, nous nous limitons à des courants faibles dans un TEC de résistance faible, le terme de puissance Joule est donc négligeable en première approximation.

L'équation (A2) précédente se réduit alors à $S_{pn} \cdot I \cdot T_F \approx K_c \cdot \delta T$: équilibre entre

effet thermoélectrique et conduction, on arrive alors à :

$$\delta T \approx \kappa I, \quad (\text{A3})$$

où $\kappa = \frac{S_{pn} \cdot T_F}{K_c}$ est assimilable à une constante instrumentale (T_F varie peu au cours d'une expérience). On écrit alors :

$$G(T_F, T_d) \approx \exp\left(-A \cdot \frac{\kappa I}{T_{ref}^2}\right) \approx \exp\left(-\frac{I}{I_0}\right) \quad (\text{A4})$$

en notant $I_0 = \frac{T_{ref}^2}{A \kappa}$.

À partir des résultats expérimentaux (cf. tableau 2 par exemple), on peut vérifier que I_0 peut être supposé constant. Avec $20 < G < 90 \%$, on obtient ici $560 < I_0 < 760 \text{ mA}$, soit $I_0 \approx 660 \text{ mA}$.

La forme analytique simple $G = f(I)$ obtenue en (A4), où intervient la valeur moyenne expérimentale de I_0 , donnerait des valeurs de H_R sensiblement différentes des valeurs calculées en utilisant (6) (cf. tableau 2), mais elle permet d'obtenir une expression simple de l'humidité relative :

$$H_R \approx \exp\left(-\frac{I_d}{I_0}\right), \quad (\text{A5})$$

et, donc, de l'incertitude sur H_R en fonction de l'incertitude expérimentale sur I_d :

$$\Delta H_R \approx H_R \times \frac{\Delta I_d}{I_0}. \quad (\text{A6})$$



Michel CABANE

Professeur émérite

Université Pierre et Marie Curie (UPMC)
Paris



François RAVETTA

Professeur

Université Pierre et Marie Curie (UPMC)
Paris



Jacques LEFRÈRE

Maître de conférences hors classe

Université Pierre et Marie Curie (UPMC)
Paris