

Hygrométrie

I Principe

1 Hygromètre à point de rosée

Les hygromètres à point de rosée sont fréquemment utilisés (industrie, météorologie ; Fig.1 à 3). Le principe en est d'observer la variation de lumière réfléchie par un miroir plan M (trajet EMR, Fig.4), lorsque sa température T varie ($T \neq T_{\text{Ambiante}}$) et que la vapeur d'eau ambiante peut s'y condenser.

Soit T_d la température de rosée ('dew point') du milieu ambiant, liée à son humidité relative H-R. Si $T > T_d$, la surface éclairée, en M, a un comportement spéculaire et les lois de la réflexion s'appliquent ; donc, si la température T du miroir est supérieure à T_d , le capteur R, reçoit, de la source E, après réflexion en M (Fig.4), un flux lumineux F constant, quelle que soit T.

Lorsque $T \leq T_d$, la vapeur d'eau se condense sur le miroir, il y a diffusion de lumière par les microgouttelettes. Dans ce cas, seule une partie de la lumière incidente est réfléchie de façon spéculaire vers le récepteur R qui, donc, ne reçoit plus la totalité du flux lumineux F ; le reste de la lumière est diffusé dans l'espace : un observateur peut alors 'voir' la surface du miroir M.

Au passage par $T = T_d$, on assiste donc à une variation brusque de l'intensité lumineuse reçue par le capteur R.

Dans les hygromètres du commerce, on ne fait pas varier continûment la température de M, mais on la maintient entre $T = T_d - \epsilon$ et $T = T_d + \epsilon$, par asservissement opto-électronique (Fig.4 : trajets EMR et E'R'). On peut ainsi, par ex. pour contrôle ou régulation, suivre les variations de T_d , donc de l'Humidité Relative, en fonction du temps.

Ici, nous nous contenterons de faire croître I, et de repérer l'apparition de rosée sur le miroir (modification d'aspect), ce qui conduira à la mesure de la température T_d du miroir dans cette configuration, et au calcul de H-R.



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

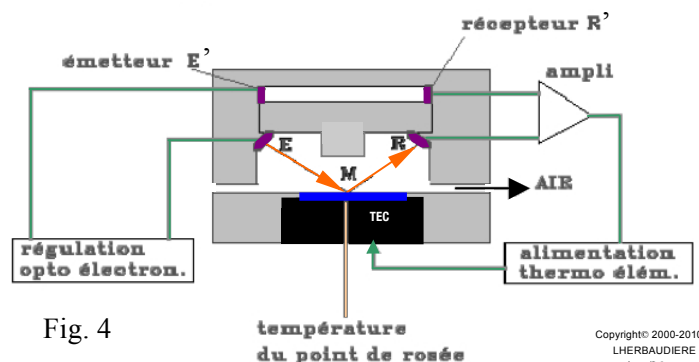


Fig. 4

Copyright© 2000-2010 LHERBAUDIERE

2 Refroidissement du miroir –modules Peltier, TEC-

Pour refroidir le miroir, on pourrait faire appel à des techniques 'macroscopiques' : évaporation d'un fluide, réfrigération classique, mais le besoin de miniaturisation, l'existence d'un environnement électronique (régulation de température, saisie de données, etc) leur font préférer le refroidissement par des TEC (Thermo-Electric-Cooler), utilisant l'effet Peltier, que l'on trouve aussi dans l'équipement informatique, automobile, spatial etc..

Un 'module Peltier' est une pompe à chaleur statique formée par un ensemble de jonctions semi-conductrices de type 'n' et de type 'p', reliées par des conducteurs, et placées entre deux plaques (Fig.5) : la plaque froide, PF, à laquelle on veut enlever de la chaleur, et la plaque chaude, PC, qui va devoir dissiper cette chaleur dans l'environnement.

Lorsqu'un courant I passe dans la suite (PC→'n'→PF→'p'→PC) (Fig.5), les électrons -négatifs- de la jonction 'n' vont à l'opposé de I, alors que les trous positifs de 'p', vont dans le sens de I. Il y a donc, dans les deux cas, un déplacement des porteurs de PF vers PC.

Il apparaît ainsi un transport d'énergie de PF vers PC. Pour que le but

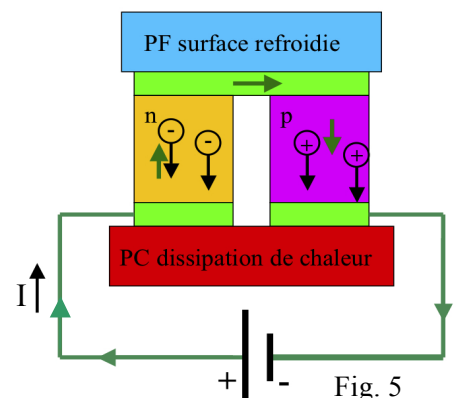


Fig. 5

soit atteint, c'est à dire que PF soit refroidie par rapport à l'environnement (cf. Fig.4), PC est maintenue à température constante. Dans notre cas, PC est un radiateur placé dans un thermostat à $T_{Ambiante}$, l'atmosphère. Alors, PC dissipe la chaleur enlevée à PF, tout en restant à $T_{PC} = T_{Ambiante}$, et PF se refroidit de ΔT par rapport à l'ambiante. Dans la réalité, $T_{PC} \gtrsim T_{Ambiante}$, en effet, le thermostat atmosphérique n'est pas parfait puisque l'air conduit peu la chaleur. Cependant, le fait que la plaque chaude soit à $T_{PC} \neq T_{Ambiante}$ n'est pas très gênant en soi, car il ne fait que modifier légèrement les performances du Peltier mais n'a pas d'impact sur son comportement : PF se refroidit.

La Figure 6, ci-contre, montre deux exemples du comportement du TEC utilisé dans le cas présent¹. Ici, la plaque chaude PC est maintenue à 27°C (Fig.6a), ou 50°C (Fig.6b). Le paramétrage selon 'Heat Load' correspond aux valeurs de la puissance 'enlevée' à la plaque PF ; donc, évidemment, à I constant, plus le TEC devra enlever de chaleur, plus il refroidira difficilement.

Le refroidisseur utilisé ici est un TEC à deux étages, mise en série de deux 'modules Peltier', ce qui permet d'augmenter la capacité de refroidissement, mais au détriment du volume du TEC et de la puissance consommée.

En théorie, un TEC Peltier est une machine thermodynamique réversible, un changement de sens du courant dans la Fig.5 transporterait donc de l'énergie de PC vers PF ; PC étant reliée à un radiateur, PF serait chauffée. En réalité, la structure d'un module à effet Peltier tel qu'il est conçu rend assez périlleuse l'inversion du courant, qui, donc, n'est pas recommandée ici.

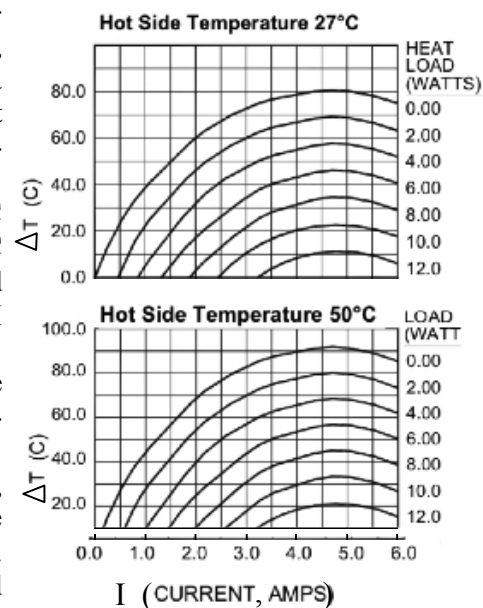


Fig. 6

3 Mesure de température –thermistance-

La mesure de la température T du miroir doit être effectuée en continu, avec un moyen de mesure présentant une faible inertie thermique. Elle est réalisée ici en utilisant une thermistance, c'est à dire une résistance dont la valeur varie avec T, ce qui permet de développer un hygromètre facile d'utilisation dans le contexte présent (observation, mesures de R, calculs).

Les thermistances sont des semi-conducteurs, généralement à base d'oxydes métalliques, qui sont tels que $R = f(T)$. Nous utiliserons ici une thermistance de type CTN (coefficient de température négatif), qui présente une caractéristique d'allure représentée Fig.7², et qui est bien modélisée par la formule paramétrée ci-dessous qui donne R en fonction de T.

$$R(T) \approx R_0 \exp [B(T^{-1} - T_{Ref}^{-1})]$$

où R_0 est la résistance de la CTN à une température T_{Ref} de référence, et B un coefficient dépendant du type de thermistance. Si les paramètres T_{Ref} , R_0 et B sont donnés par le fournisseur, ou déterminés après étalonnage, la mesure de R permet d'accéder facilement, par cette formule, à la valeur de la température T à laquelle R est portée.

La thermistance CTN utilisée ici³ a comme paramètres $R_0 = 170 \text{ k}\Omega$, et $B = 4540 \text{ K}$, pour $T_{Ref} = 273 + 25 = 298 \text{ K}$.

4 Pression de vapeur saturante

Le calcul de la pression de vapeur saturante $p_{sat}(T)$ de l'eau liquide peut se faire à partir de la formule de Clapeyron. Supposons que la vapeur d'eau se comporte comme un gaz parfait et que son enthalpie de vaporisation soit constante dans la plage de température considérée (pas de changement de phase) ; notons M et L_v la masse molaire et la chaleur latente de changement de phase de l'eau liquide, R_g la constante des gaz parfaits. Soit p_{Ref} la pression de vapeur saturante à une température de référence T_{Ref} , on arrive, avec une bonne approximation, à $p_{sat}(T) \approx p_{Ref} \exp[(M L_v / R_g) (T_{Ref}^{-1} - T^{-1})]$, ce qui peut s'écrire, en notant A un paramètre exprimé en Kelvins :

$$p_{sat}(T) \approx p_{Ref} \exp[A (T_{Ref}^{-1} - T^{-1})]$$

En se référant aux valeurs tabulées de $p_{sat}(T)$, on montre que, dans l'intervalle 0°C—30°C, avec $T_{Ref} = 298 \text{ K}$ d'où $p_{Ref} = 31,7 \text{ hPa}$, la valeur $A = 5340 \text{ K}$ permettra de calculer analytiquement $p_{sat}(T)$ avec moins de 1% d'erreur.

¹ TEC Marlow NL2063T

² Une résistance 'classique' voit sa valeur croître avec T, il en est de même dans le cas d'une thermistance de type CTP.

³ CTN Siemens B57164 K 164/470/k+

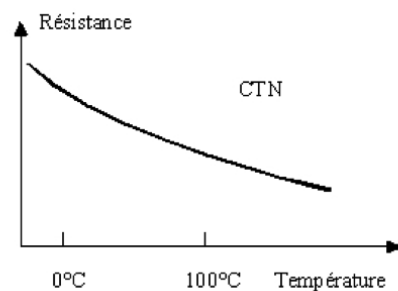


Fig. 7

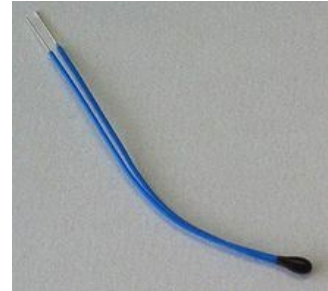
5 Utilisation de l'hygromètre

Il est maintenant aisé de déterminer le degré hygrométrique de l'air. Le passage d'un courant électrique I dans le TEC permet de noter la valeur I_d à laquelle correspond le début de la condensation d'eau sur PF. Quand $I=I_d$, en mesurant la résistance d'une thermistance C_P placée sur P_F , on connaît la température T_d correspondante.

Le 'tube carré' qui se trouve sous l'ensemble Peltier-thermistance est balayé par un flux d'air, qui permet d'évacuer la chaleur de la plaque chaude. Une thermistance C_A est disposée dans ce flux d'air, juste à l'entrée dans l'hygromètre. Elle permet de mesurer la température de l'air ambiant $T_{Ambiante}$. La connaissance des deux températures permet d'obtenir l'humidité relative H-R. (voir abaques).



TEC Peltier deux étages



Thermistance CTN

II Principe de l'expérience

1 Ventilation

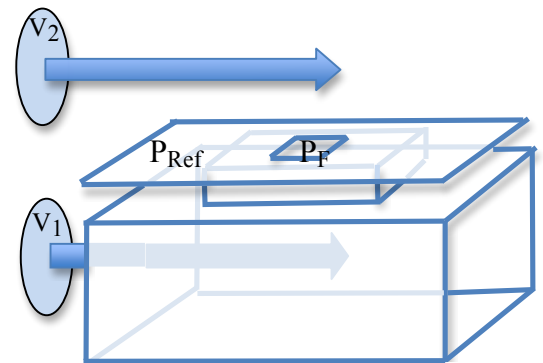
La plaque froide PF est entourée d'une plaque de référence, P_{ref} , à la température ambiante.

L'hygromètre à point de rosée a sa plaque 'miroir' refroidie par un TEC Peltier, qui prélève de la chaleur, donc refroidit celle-ci, en réchauffant la partie 'chaude' de l'élément TEC Peltier, reliée mécaniquement et thermiquement à un 'tube carré' qui sert à dissiper la chaleur dans l'air ('thermostat'). Il faut donc évacuer ces calories (voir paragraphe 5 ci-dessus). Un ventilateur V_1 , alimenté en 12V, souffle donc de l'air dans le tube carré.

Il faut renouveler l'air qui se trouve au dessus de la plaque froide, et qui perd son humidité ; une ventilation forcée (ventilateur V_2 alimenté en 12V) souffle de l'air sur la plaque froide.

De façon à ce que la mesure ne soit que peu perturbée par la présence de l'observateur (humidité de la respiration, par ex.), le soufflage d'air des deux ventilateurs se fait en direction de l'opérateur.

Connectique : on utilise une seule alimentation pour les deux ventilateurs, la connexion vers ces alimentations se trouve sur une grande face du 'tube carré'.



2 Alimentation du Peltier

Le TEC est alimenté par une alimentation en courant. Ici, à l'inverse des alimentations électriques utilisées habituellement (alimentations en tension) l'opérateur fixe la valeur du courant qu'il a l'intention de faire passer à travers le montage, et la tension s'ajuste automatiquement, si l'impédance varie, de telle sorte que I soit maintenu constant. Cce principe inverse donc les rôles de I et V par rapport à ce que l'on a dans une alimentation classique où c'est la tension V qui est contrôlée par l'opérateur.

L'alimentation commerciale (A) utilisée ici peut fonctionner -soit à V constant si Z varie (c'est le cas des alimentations classiques : I s'ajuste selon Z), -soit à I constant (notre cas) ; en fait, dans les deux cas une valeur maximale de la puissance à fournir, définie par le constructeur, limite les valeurs atteignables par I et V .

Pour travailler à I constant, il faut donc, successivement : (a) avant la connexion régler I et V à zéro, (b) établir la connexion, (c) conserver I à $I=0$, et placer V à une valeur arbitraire, (d) commencer l'étude en donnant des

valeurs successives à I à l'aide du potentiomètre 'intensité' (si I ne peut être augmenté, c'est que la puissance disponible, $V.I$, est trop faible, augmenter la valeur de V).

Connectique : la connexion à l'élément Peltier (vers l'alimentation de courant A) se trouve sur une grande face du 'tube carré'.

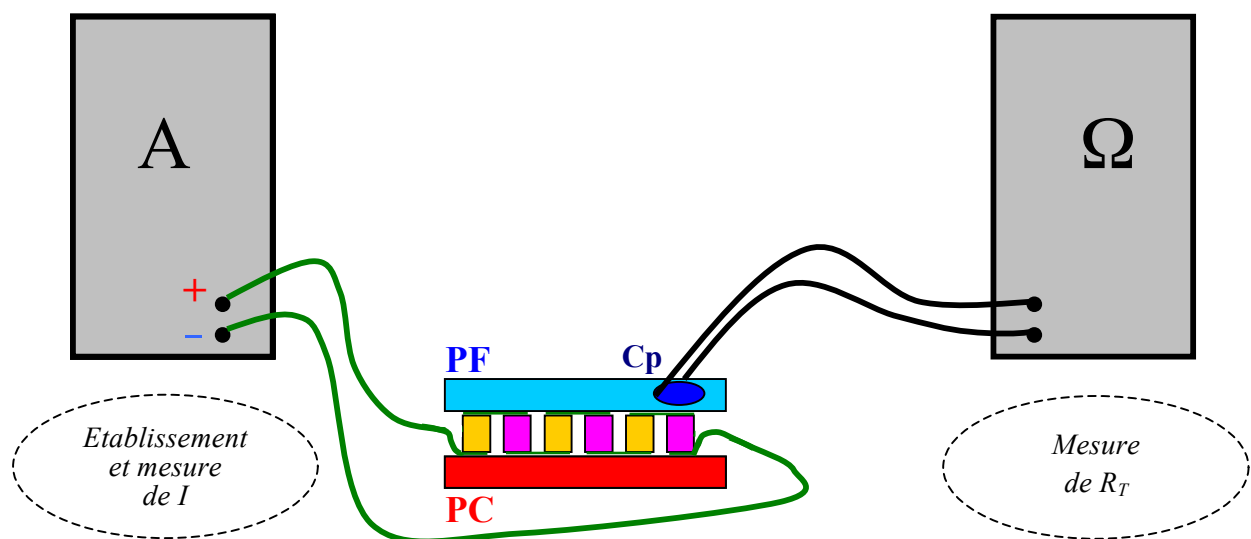
3 Température

Deux mesures de température sont possibles, via la mesure de la valeur de la résistance d'une thermistance CTN (voir plus haut). La température T_P de PF, la plaque froide du Peltier est mesurée à l'aide d'une thermistance, C_P , de résistance R_P , noyée dans la plaque froide. Afin de connaître la température de l'air ambiant, C_A , une thermistance C_A de résistance R_A est placée dans le flux d'air qui pénètre dans l'hygromètre (dans le 'tube carré'). La mesure d'une résistance à l'ohmmètre (Ω) permet, connaissant l'équation de sa caractéristique, d'en déduire la valeur de la température au point de mesure.

Connectique : les connexions aux thermistances (vers l'ohmmètre) se trouvent sur une grande face du 'tube carré'.

II Déroulement de l'expérience

- 1 Alimenter les deux ventilateurs. Relier l'ohmmètre (Ω) à la thermistance C_P , et mesurer la valeur de R_T . En déduire la valeur initiale de la température de la plaque froide du Peltier, T_{P0} , qui représente $T_{Ambiante}$, la température ambiante. Comparer à la valeur obtenue en utilisant la thermistance C_A . On mesurera périodiquement $T_{Ambiante}$, qui peut varier pour diverses raisons (heure de la journée, etc.)
- 2
 - a) Relier l'alimentation de courant (A) au module à effet Peltier. Etablir un courant $I = 0,3$ A dans le module Peltier, attendre 4 à 5 minutes. Mesurer R_T à l'aide de l'ohmmètre (Ω).⁴
 - b) Faire varier le courant de $I = 0,3$ A à $I = 0,6$ A, par pas de 0,1 A, en attendant une à deux minutes entre deux ajustements du courant, avant de noter la valeur de la résistance R_T . A chaque pas de I correspond donc un couple (I, R_T) .⁵
 - c) Noter la valeur du courant à laquelle est associée l'apparition d'un voile de gouttelettes condensées sur la face froide de l'hygromètre (le miroir), soit I_d cette valeur, mesurer $T_{Ambiante}$.
 - d) Effectuer encore deux mesures à $I \approx I_d + 0,1$ A et $I \approx I_d + 0,2$ A.
- 3
 - a) A partir des couples (R_T, I) , tracer $T_{Ambiante} - T_P = f(I)$, comparer à la Figure 6a
 - b) Connaissant I_d , mesuré à la question 2c, en déduire $T_d \pm \Delta T_d$, température du point de rosée.
- 4 En déduire l'humidité relative à la température ambiante : $HR = \frac{p_{Ambiante}}{p_{sat}(T_{Ambiante})}$.



⁴ Lorsqu'un courant I est établi dans le module à effet Peltier (PF-PC) à l'aide du générateur de courant A , on observe une évolution dans le temps de la valeur de R_T mesurée, ce qui est normal, car PF se stabilise en température. On ne retiendra que les valeurs finales 'asymptotiques'.

⁵ Même remarque qu'en ⁴