

Manipulation 4

Hygrométrie

Consignes de sécurité

- En cas d'accident, avertissez immédiatement l'assistant. Si une intervention des urgences est nécessaire, appelez le "7" (téléphones ULB) ou le "112".

4.1 But de l'essai

La manipulation proposée consiste à déterminer le degré hygrométrique de l'air ambiant. Cette détermination sera faite à l'aide de trois appareillages différents :

- un hygromètre à cheveux
- un psychromètre d'Assmann
- un hygromètre à point rosée

On comparera les valeurs obtenues par ces trois méthodes et on déterminera en outre le profil de température dans la barre de cuivre de l'hygromètre à point rosée.

4.2 Rappels - Définitions

L'air humide est un mélange d'air et de vapeur d'eau qui, pour autant qu'il ne soit pas saturé, se comporte pratiquement comme un mélange de deux gaz parfaits. On désigne :

- p : pression de l'air humide
- p_a : pression partielle de l'air sec
- p_v : pression partielle de la vapeur d'eau
- m : la masse d'air humide
- m_a : la masse d'air sec
- m_v : la masse de vapeur d'eau

Comme nous admettons que l'air humide est un mélange de deux gaz parfaits, on peut appliquer la loi de Dalton :

$$p = p_a + p_v \quad (4.1)$$

4.2.1 Définitions

En pratique, la teneur en vapeur d'eau de l'air humide est définie soit par l'humidité absolue, soit par l'humidité relative ou degré hygrométrique.

L'humidité absolue, que nous désignons par x , est par définition égale au rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air humide à la masse d'air sec correspondante :

$$x = \frac{m_v}{m_a} \quad (4.2)$$

L'humidité absolue suffit à elle seule à définir la teneur en eau de l'air humide.

L'humidité relative, que nous désignerons par φ , est égale par définition au rapport de la masse de vapeur d'eau m_v contenue dans un volume d'air humide, à la masse de vapeur d'eau m'_v que contiendrait ce volume s'il était saturé de vapeur d'eau à la même température; comme nous admettons que la vapeur d'eau est assimilable à un gaz parfait, l'humidité relative est aussi égale au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air humide à la pression de saturation p'_v correspondant à la même température :

$$\varphi = \frac{m_v}{m'_v} = \frac{p_v}{p'_v} \quad (4.3)$$

A l'inverse de l'humidité absolue, l'humidité relative ne suffit pas à elle seule à définir la teneur en eau de l'air humide; cette notion doit être complétée par la température et la pression de l'air humide.

4.3 L'hygromètre à cheveux

L'hygromètre à cheveux est un appareil très simple basé sur le fait que la longueur d'un cheveu dégraissé varie avec le degré hygrométrique de l'air ambiant, Figure 4.1. Lorsque φ augmente, sa



FIGURE 4.1. Hygromètre à cheveux.

longueur diminue. Cette variation est amplifiée par un levier qui déplace une aiguille devant des graduations. Les indications de cet appareil sont peu précises. On lit dans l'air ambiant la valeur de φ .

4.4 Psychromètre d'Assmann

4.4.1 Description et principe de fonctionnement

Il est constitué de deux thermomètres dont les bulbes sont dans des gaines où l'air ambiant circule à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde grâce à un ventilateur.

Le bulbe du thermomètre de gauche (appelé thermomètre humide) est recouvert d'un manchon destiné à être imbibé d'eau distillée.

Soit le système ouvert limité par le thermomètre humide, les parois de la gaine où circule l'air et deux sections droites 1 et 2 (Figures 4.2(a) and 4.2(b)).

N.B. : les tables de tensions de vapeur de l'eau sont disponibles dans le laboratoire.

Supposons le système en régime du point de vue intensif. Au point de vue extensif, on ne

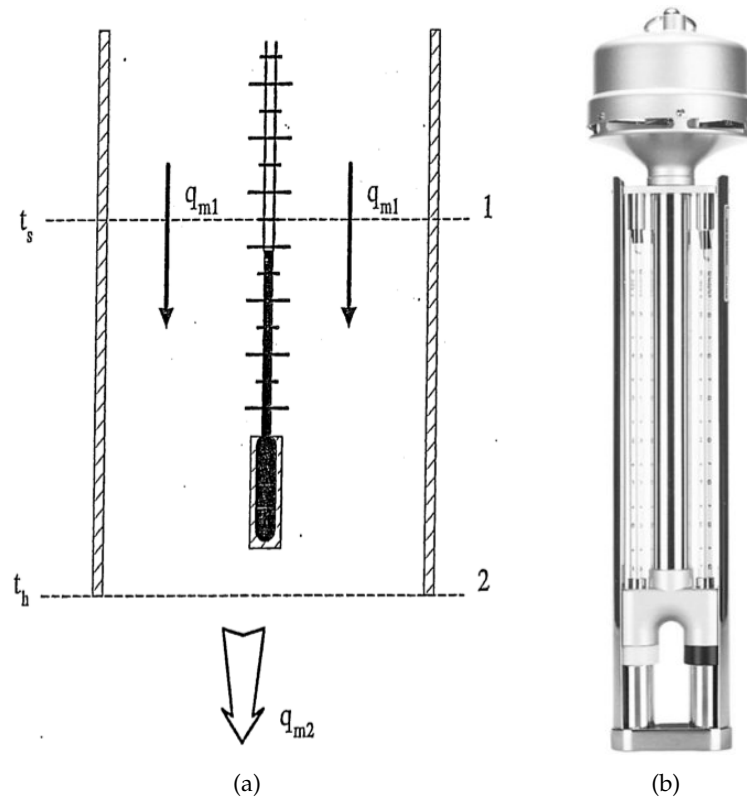


FIGURE 4.2. Schéma du psychromètre d'Assmann.

peut avoir d'état de régime à cause de l'évaporation de l'eau du manchon, dont l'état intensif ne change pas ($T=T_h$).

Supposons de plus que l'air et la vapeur d'eau sont parfaits, l'air en 2 est uniforme et à la température du thermomètre sec T_s . Le premier principe appliqué au système décrit ci-dessus s'écrit :

$$0 + 0 = \frac{dm_{eau}}{d\tau} h_l(T_h) + \dot{m}_2 h_2(T_h) - \dot{m}_1 h_1(T_s) \quad (4.4)$$

avec :

- h_l : enthalpie massique de l'eau à T_h

Les débits massiques :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{a_1} + \dot{m}_{v_1} \quad (4.5)$$

- $\dot{m}_{a_1}$: débit d'air sec en 1
- $\dot{m}_{v_1}$: débit de vapeur d'eau en 1

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{a_2} + \dot{m}_{v_2} \quad (4.6)$$

- $\dot{m}_{a_2}$: débit d'air sec en 2
- $\dot{m}_{v_2}$: débit de vapeur d'eau en 2

On a donc :

$$\frac{dm_{eau}}{d\tau} h_l(T_h) + \left[\dot{m}_{a_2} h_a(T_h) + \dot{m}_{v_2} h_v(T_h) \right] - \left[\dot{m}_{a_1} h_a(T_s) + \dot{m}_{v_1} h_v(T_s) \right] = 0 \quad (4.7)$$

La conservation de la masse d'air sec et de la masse d'eau s'écrit :

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a \quad (4.8)$$

$$\frac{dm_{eau}}{d\tau} = \dot{m}_{v_1} - \dot{m}_{v_2} \quad (4.9)$$

d'où

$$\dot{m}_{v_1} \left[h_l(T_h) - h_v(T_s) \right] - \dot{m}_{v_2} \left[h_l(T_h) - h_v(T_h) \right] + \dot{m}_a \left[h_a(T_h) - h_a(T_s) \right] = 0 \quad (4.10)$$

Enfin, les gaz étant parfaits, les pressions partielles sont proportionnelles aux nombres de moles ou aux débits molaires.

$$\frac{M_a}{M_v} \frac{\dot{m}_{v_1}}{\dot{m}_a} = \frac{p_v}{p_a} = \frac{p_v}{p_{atm} - p_v} \approx \frac{p_v}{p_{atm}} \quad (4.11)$$

$$\frac{M_a}{M_v} \frac{\dot{m}_{v_2}}{\dot{m}_a} = \frac{p'_v(T_h)}{p_a} \approx \frac{p'_v}{p_{atm}} \quad (4.12)$$

N.B. :

$$M_a = 28,86 \text{ g/mole} \quad M_v = 18 \text{ g/mole}$$

En multipliant la relation (4.10) par :

$$-\frac{M_a}{M_v} \frac{1}{\dot{m}_a} \quad (4.13)$$

on a :

$$\frac{p_v}{p_{atm}} \left[l_v(T_h) + C_{p_v}(T_s - T_h) \right] - \frac{p'_v}{p_{atm}} l_v(T_h) + \frac{M_a}{M_v} C_{p_a}(T_s - T_h) = 0 \quad (4.14)$$

En négligeant le terme $C_{p_v}(T_s - T_h)$ devant $l_v(T_h)$, on obtient finalement :

$$p_v = p'_v(T_h) - \frac{p_{atm}}{M_v} \frac{C_{p_a} M_a}{l_v(T_h)} (T_s - T_h) \quad (4.15)$$

$$p_v = p'_v(T_h) - \frac{M_a}{M_v} p_{atm} A (T_s - T_h) \quad (4.16)$$

Il s'agit de la formule des météorologistes, $A = \frac{C_{p_a}}{l_v(T_h)}$ est la constante psychrométrique.

4.4.2 Mode opératoire

Dévisser la partie inférieure de la gaine de gauche de façon à rendre accessible le réservoir de mercure du thermomètre humide. Imbiber le manchon d'eau distillée, puis remonter la gaine et démarrer le ventilateur. Noter la température du thermomètre humide (T_h) toutes les 10 secondes pendant la première minute, puis toutes les 30 secondes pendant environ 10 minutes. Vous obtenez une courbe semblable à celle de la Figure 4.3 qui présente un palier dont la température correspondante s'appelle température du thermomètre humide.

La lecture à l'autre thermomètre faite à ce moment s'appelle température du thermomètre sec (T_s)

Attention : veuillez à ne pas projeter votre haleine en direction des bulbes des thermomètres !

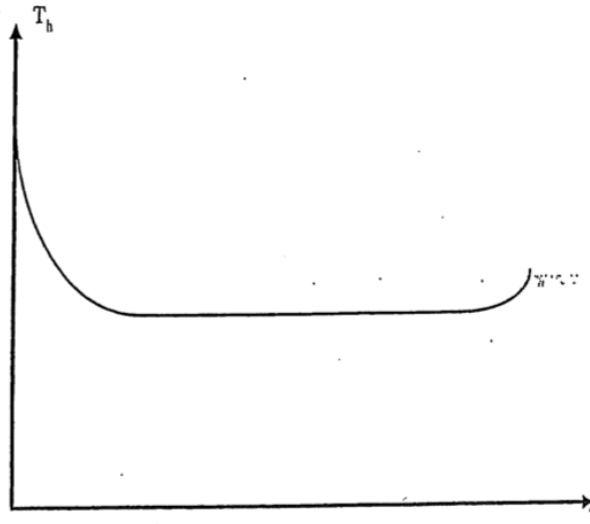


FIGURE 4.3. L'évolution de la température humide.

4.4.3 Déterminer φ

1. à l'aide du diagramme psychrométrique du laboratoire ; ce diagramme est constitué d'un réseau de courbes à constant tracées dans des axes $[T_s, T_s - T_h]$
2. à partir de la définition (4.3) et de l'équation de fonctionnement (4.16).

4.5 Hygromètre à point de rosée

4.5.1 Principe

Le principe de cet appareil est simple : il est constitué d'une barre de cuivre brillante placée dans l'air ambiant et dont les extrémités sont maintenues à des températures différentes. L'une des extrémités est notamment refroidie par une source à température T_0 ($T_0 < T_{\text{ambiante}}$). A cause des échanges de chaleur par conduction, convection et rayonnement avec l'ambiance, la température de la tige n'est pas uniforme et varie en fonction de x , distance entre un point de la tige et son extrémité refroidie.

La pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air ambiant est p_v . Il y aura condensation d'eau sur la tige (rosée) si la température de celle-ci est telle que la tension de vapeur à cette température est inférieure à p_v . Il y aura de même solidification de l'eau sur la tige si la température de celle-ci est inférieure à la température de solidification. Lorsque les couches d'eau liquide et solide sont suffisantes pour être observées, la tige se présentera comme suit :

- une zone mate couverte de glace
- une zone mate couverte de rosée avec $p'_v < p_v$
- une zone brillante avec $p'_v > p_v$

La ligne de séparation entre ces deux dernières zones est appelée front de rosée. Elle est caractérisée par une température T_{AB} telle que $p'_v(T_{AB}) = p_v$.

Dès lors, pour déterminer p_v , il suffit de mesurer la température au droit du front de rosée. Le degré hygrométrique se déduit alors de la définition (4.3).

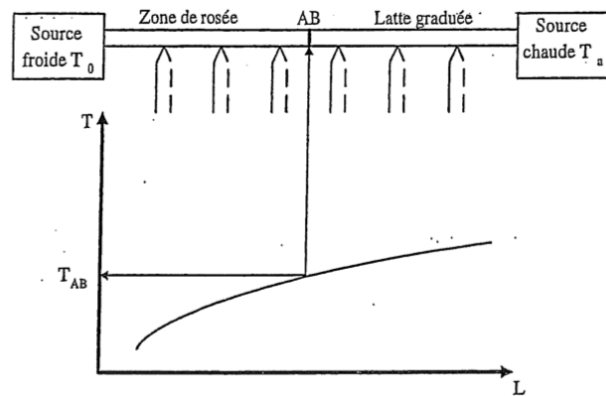


FIGURE 4.4. Schéma d'hygromètre à point de rosée.



FIGURE 4.5. Schéma d'hygromètre à point de rosée.

4.5.2 Dispositif expérimental

Voir les Figures 4.4 et 4.5. La barre de cuivre a 25 cm de long ; 2,5 cm de large ; 0,4 cm d'épaisseur. Sur la face supérieure sont gravées des graduations de mm en mm. Sur la face avant sont soudés 6 fils de constantan équidistants, espacés de 5 cm, constituant ainsi 6 thermocouples Cuivre-Constantan qui permettent de déterminer la répartition de température le long de la barre. Un thermocouple Nickel, Nickel-Chrome est placé au milieu de la face arrière. Chaque extrémité de la barre est encastrée dans un barreau métallique creux dans lequel on fait circuler un fluide destiné à refroidir ou à réchauffer cette extrémité.

L'extrémité gauche de la barre de cuivre est refroidie au moyen d'une circulation d'alcool méthylique provenant d'un bain thermostaté (maintenu à température constante), maintenu à une température plus basse que l'ambiance par une machine frigorifique.

L'extrémité droite de la barre est thermostatée par une circulation d'eau de ville.

4.5.3 Mode opératoire

Avant d'effectuer les mesures, veiller à ce que la température de chaque point soit stabilisée.

- Relever la position du front de rosée et éventuellement celle du front de glace
- Relever $T=f(x)$ à l'aide des thermocouples et du millivolt-mètre. Porter la courbe en graphique (constante des thermocouples : $25,806^{\circ}\text{C/mV}$)

- Déterminer, à l'aide de ce graphique, T_{AB} et $p'_v(T_{AB})$.
- Calculer φ

Mesurer les températures aux extrémités de la barre (température au cryothermostat, température d'entrée et de sortie de l'eau de ville).

4.6 Présentation des résultats

4.6.1 Degré hygrométrique

Dressez un tableau récapitulatif des résultats obtenus avec les différents appareils étudiés. Comparez-les et discutez les avantages et les inconvénients des différents hygromètres tant du point de vue de la précision que de la facilité d'emploi.

4.6.2 Profil de température dans la barre de cuivre

Déterminez, par calcul, le profil de température. Pour ce faire, appliquez le premier principe de la thermodynamique au système fermé constitué par une portion de barre d'épaisseur dx et de section S (section droite de la barre), en supposant :

- la température T uniforme dans toute section droite
- que seuls interviennent les échanges de chaleur par conductibilité thermique longitudinale dans la barre et par convection naturelle avec l'air ambiant

En déduire la relation

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = \omega^2\theta \quad (4.17)$$

où

- $\theta = T_a - T$
- $\omega^2 = \frac{h_p}{S \cdot k}$
- T_a : température ambiante
- h : coefficient d'échange par convection avec l'air ambiant
- p : périmètre de la section droite de la barre
- k : coefficient de conductibilité thermique du cuivre

Intégrez l'équation précédente en prenant comme conditions aux limites :

$$x = 0 \rightarrow \theta = \theta_1 = T_a - T_1$$

$$x = L \rightarrow \theta = \theta_2 = T_a - T_2$$

et montrez que l'on a :

$$\frac{\theta_1 + \theta_2}{2\theta_3} = \cosh\left(\frac{\omega L}{2}\right) \quad (4.18)$$

avec :

$$\theta = \theta_3 \text{ pour } x = \frac{L}{2}$$

En déduire l'allure du profil des températures et vérifier ainsi qu'il n'est pas linéaire.

Calculez la valeur du coefficient h (prendre comme coefficient de conductibilité thermique du cuivre $k = 400 \text{ W/(mK)}$).

4.7 Préparations, mesures, résultats

1. Prédéterminations et résultats théoriques :
 - (a) Démontrez la relation (4.17)
 - (b) Intégrez cette relation de manière à déduire l'allure du profil des températures et vérifier ainsi qu'il n'est pas linéaire
2. Valeurs à mesurer :
 - (a) Relevez la température et la pression de l'air ambiant
 - (b) Relevez l'humidité relative de l'air à l'aide du psychromètre à cheveu
 - (c) Psychromètre d'Assman :
 - i. Relevez la température du thermomètre sec au début et à la fin de la manipulation
 - ii. Relevez la température du thermomètre humide toutes les 10 secondes pendant la première minute et ensuite toutes les 30 secondes pendant environ 10 minutes
 - (d) Psychromètre à point rosée :
 - i. Relevez la position du front de rosée ainsi que la position du front de glace
 - ii. Relevez la température du méthane ainsi que la température de l'eau d'alimentation
 - iii. Relevez la tension de chaque thermocouple
3. Résultats expérimentaux :
 - (a) Psychromètre d'Assmann
 - i. Déterminez φ à l'aide du diagramme psychrométrique
 - ii. Déterminez ensuite φ à l'aide de la définition (4.3) et de l'équation (4.16)
 - (b) Psychromètre à point rosée
 - i. Portez en graphique $T(x)$
 - ii. Déterminez T_{AB} et $p'_v(T_{AB})$
 - iii. Calculez φ
 - (c) Comparez les valeurs de l'humidité relative trouvée avec les différents appareils et discutez des avantages et inconvénients de chacun
 - (d) En utilisant l'allure du profil de température dans la barre que vous avez prédéterminé, déterminez la valeur du coefficient h .