A. Questions

1. La densité d'un gaz est proportionnelle à sa masse volumique (notée ρ). D'après la loi des gaz parfait, on a :

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

À pression et température égales, la masse volumique d'un gaz est donc proportionnelle à sa masse molaire moléculaire. La masse molaire moléculaire de l'air sec est égale à 28,8 g/mol (cf. cours page 2.2) ; celle de l'eau est égale à 18 g/mol. La vapeur d'eau est donc moins dense que l'air sec. En humidifiant l'air tout en conservant la pression totale constante ainsi que la température, on remplace un composant du mélange gazeux (de l'air sec) par un composant moins dense (de la vapeur d'eau). Dans les mêmes conditions de pression et température, l'air humide est donc moins dense que l'air sec ; et par conséquent, il a tendance à monter.

2. L'air qui traverse le « thermomètre humide » évapore de l'eau contenue dans la gaze humide de telle sorte que l'humidité relative du courant d'air atteint pratiquement 100%. La chaleur nécessaire à cette évaporation est prise à l'air lui-même, qui voit par conséquent sa température décroître. La température obtenue est appelée « température humide ».

Au cours de ce processus, l'enthalpie de l'air n'a pas varié car toute la chaleur latente nécessaire à l'évaporation$(\Delta m_{\text{évaporée}} \cdot L)$est fournie par la chaleur sensible résultant du refroidissement de l'air$(m_{\text{air}} \cdot C_p \cdot \Delta\theta)$.Ceci explique pourquoi, dans le diagramme psychrométrique, les droites de « température humide » sont isenthalpiques. La « température humide » s'obtient donc en suivant cette direction isenthalpique jusqu'au croisement de la courbe de saturation.

3. En se balançant, « l'oiseau buveur » évapore de l'eau grâce à son bec. Mais l'air sous la cloche finit par se saturer en vapeur d'eau, et cette évaporation ne peut plus avoir lieu. À ce moment-là, HR = 100 % et les températures « sèche » et « humide » sont égales. Par conséquent, le bec n'est plus un point froid (élément moteur du système basculant à alcool). L'oiseau arrête donc de se balancer.

Il existe plusieurs méthodes pour le faire repartir :
- Augmenter la température de l'air sous la cloche, ce qui a pour conséquence de baisser l'humidité relative (HR < 100 %).
- Mettre un point froid sur l'enveloppe de la cloche, ce qui a pour but de condenser l'humidité (point de rosée), et donc de diminuer la teneur en vapeur d'eau ; l'air sous la cloche n'est alors plus saturé.
- Introduire un produit dessicatif (par exemple une gaze hydrophile : « qui absorbe l'eau »), ce qui diminuera également la teneur en vapeur d'eau.

4. Cette équation provient de l'expression générale de l'enthalpie d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau :

$$i = (C_{p\ air\ sec} + x \cdot C_{p\ vap.\ eau}) \cdot \theta + L_{évap,\ 0°C} \cdot x\ [\text{kJ/kg}_{\text{air sec}}]$$

Chaleurs spécifiques :

$$C_{p\text{air sec}} = 1{,}0\ \text{kJ/kg}_{\text{air sec}} \cdot \text{K}$$
$$C_{p\text{vap eau}} = 1{,}8\ \text{kJ/kg}_{\text{vap eau}} \cdot \text{K}$$

Chaleur latente :

$$L_{évap,\ 0°C} = 2{,}5 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}_{eau}$$

Les coefficients 1 ; 1,8 ; $2{,}5 \cdot 10^3$ ne sont donc pas des constantes sans unité.

B. Problèmes

Problème 1 :

On pose : m_{eau} = masse d'eau initiale = 0,400 kg
m_{glace} = masse de glace initiale = 0,059 kg
$T_{i\ eau}$ = température initiale de l'eau = 22,45 °C
T_f = température finale de l'eau = 11,45 °C
$T_{i\ glace}$ = température de la glace = 0 °C

L'énergie nécessaire à faire fondre la glace et à amener l'eau ainsi créée à la température finale s'obtient en calculant :

$$\Delta Q_{\text{glace}} = m_{\text{glace}} \cdot L + m_{\text{glace}} \cdot C_{p\ \text{eau}}(T_f - T_{i\ \text{glace}})$$

où : L = chaleur latente de fusion de la glace (ce qu'on cherche à déterminer).
$C_{p\text{eau}} = 4.19 \cdot 10^3 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ = capacité thermique massique de l'eau.

Dans notre système, d'où vient l'énergie nécessaire ΔQ_{glace} ? En considérant le système totalement isolé de l'extérieur, il ne reste qu'une possibilité : l'énergie ΔQ_{glace} vient du refroidissement ΔQ_{eau} de l'eau initialement contenue dans le bécher. On peut donc aussi écrire :

$$\Delta Q_{\text{eau}} = m_{\text{eau}} \cdot C_{p\ \text{eau}}(T_f - T_{i\ \text{eau}})$$

Le système étant isolé, l'énergie totale est conservée.
Par conséquent, la grandeur $\Delta Q_{tot} = \Delta Q_{glace} + \Delta Q_{eau}$ est nulle. Il s'ensuit que:

$$L = C_{p\ \text{eau}} \cdot [(T_{i\ \text{glace}} - T_f) + (m_{\text{eau}}/m_{\text{glace}}) \cdot (T_{i\ \text{eau}} - T_f)]$$

En introduisant les valeurs numériques on obtient : **L = 2,6·10⁵ J/kg**.
Or, la valeur tabulée est : **L = 3,34·10⁵ J/kg** (cf. polycopié p. 2.13).

Explication de la différence :
On voit que nous sous-estimons la valeur de L pour notre expérience, c'est-à-dire que nous avons sous-estimé l'énergie nécessaire à faire fondre la glace. Reprenons nos hypothèses : nous avons dit que le système est isolé de l'extérieur. Or, dans la réalité, ce n'est pas le cas, une certaine quantité d'énergie est venue de l'extérieur et nous ne l'avons pas mesurée. Deuxièmement nous avons dit : l'énergie provient du refroidissement de l'eau. En réalité le récipient (bécher) se refroidit aussi un peu et fournit une certaine énergie dont nous n'avons pas tenu compte. Troisièmement, lorsque l'on a pesé la glace, une certaine partie de celle-ci était probablement déjà fondue, de sorte que nous avons dû légèrement surestimer m_{glace}, d'où une sous-estimation de L (cf. formule).

Problème 2 :

Pour l'humidificateur n°1, on calcule l'énergie consommée pendant 1 heure :

$$E_1 = V \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot C_{p\ \text{eau}} \cdot \Delta\theta + V \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot L_{\text{vap (100°C)}}$$

où V est le volume d'eau évaporé en 1 heure = 0,0002 m^3 ; $L_{vap(100°C)}$ = 2261 kJ/kg ; ρ_{eau} = 1000 kg/m^3 ; $C_{p\ eau}$ = 4,19 kJ/kg·K ; Δθ = l'élévation de température de l'eau pour la faire bouillir = (100 − 20) = 80 °C.

On obtient : $$E_1 = 519\text{kJ}$$

Pour l'humidificateur n°2, l'énergie consommée se calcule simplement par :

$$E_2 = P_2 \cdot 3600\text{s} = 252\text{kJ}$$

Avec P_2 : puissance du moteur = 70 W.

La différence (facteur 2) provient du fait que la chaleur d'évaporation est fournie par le corps de chauffe de l'humidificateur n°1, tandis qu'avec l'humidificateur n°2, c'est l'air de la pièce qui fournit cette même chaleur.

Problème 3 :

On part de l'hypothèse que la pièce n'est pas chauffée par un apport autre que celui de l'humidificateur.
Dans les deux cas, la teneur en vapeur d'eau sera augmentée de la même quantité Δx :

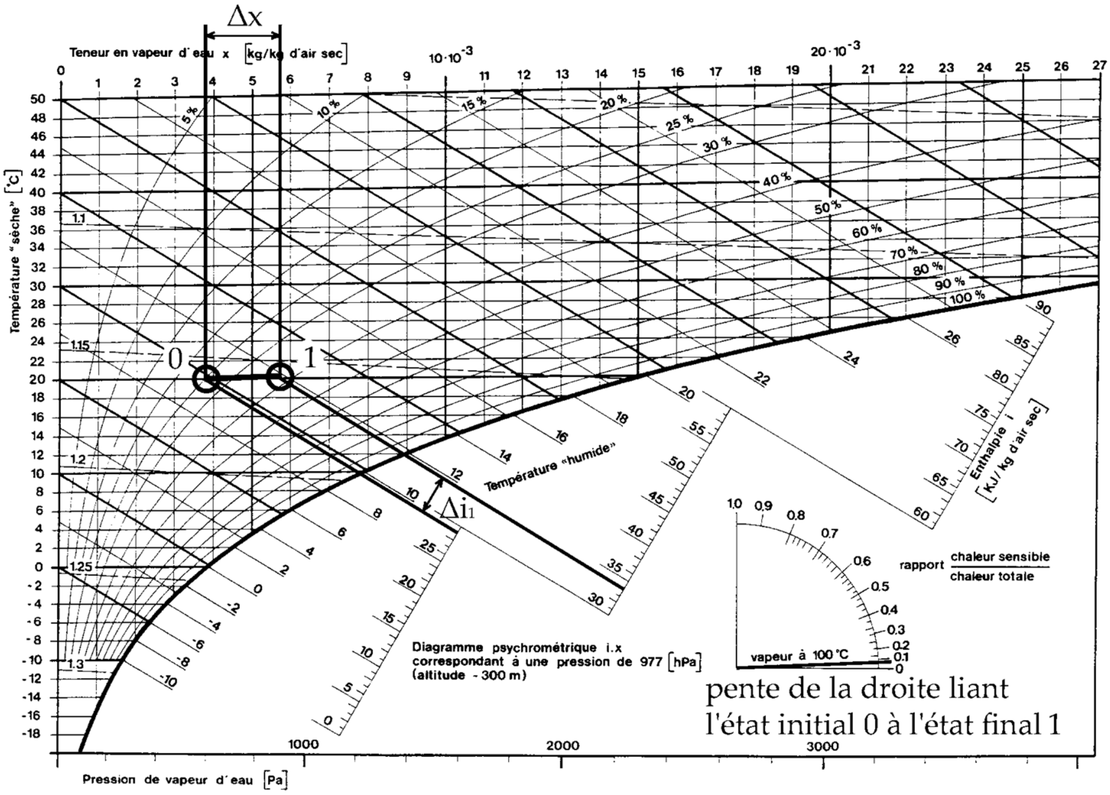
$$\Delta x = \frac{m_{\text{eau apportée}}}{m_{\text{air sec}}} = \frac{\rho_{\text{eau}} \cdot V}{m_{\text{air sec}}} = \frac{10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{100} = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{air}}$$

<u>Dans le premier cas :</u> (évaporateur)

La plus grande partie de l'énergie sert à évaporer l'eau (ce qui ne modifie pas la température de la pièce). Seule une faible partie contribue à chauffer l'air de la pièce (par refroidissement de la vapeur, de 100 °C à la température ambiante). La variation d'enthalpie de la pièce est donnée par :

$$\Delta i_1 = \frac{E_1}{m_{\text{air sec}}} = \frac{519\text{kJ}}{100\text{kg}} = 5{,}2\ \text{kJ/kg}$$

Sur le diagramme i-x, on part de la situation initiale (θ = 20 °C, HR = 25 % ; point 0 sur le diagramme). La situation finale aura une teneur en vapeur d'eau supérieure de $\Delta x = 2\cdot10^{-3}$ et une enthalpie supérieure de Δi_1 = 5,2. On remarquera que la pente de la droite liant les points 0 et 1 se trouve aussi sur l'échelle d'humidification (en bas à droite) :



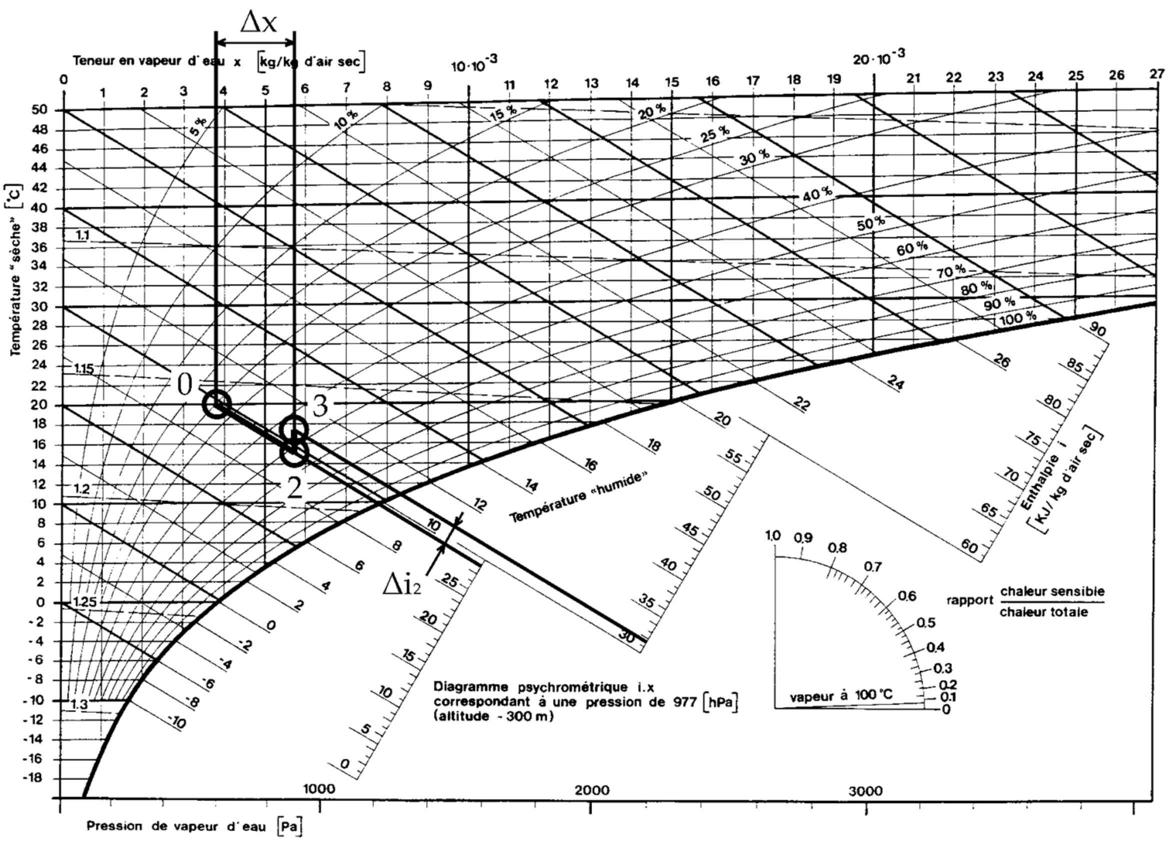
On a donc finalement : nouvelle température de l'air ≈ 20,2 °C
nouvelle humidité relative ≈ 37 %
différence d'enthalpie (Δi_1) = 5,2 kJ/kg

Dans le second cas : (pulvérisateur)

L'air de la pièce fournit l'énergie de vaporisation, donc l'enthalpie reste constante (il n'y a en fait qu'un changement de chaleur sensible en chaleur latente). Du point 0, on aboutit au point 2 en suivant une ligne d'enthalpie constante (pente également donnée sur l'échelle d'humidification).

On ne s'arrête pas là. En effet il faut tenir compte de l'énergie E_2 fournie au moteur, qui finalement réchauffe l'air de la pièce. On passe ainsi du point 2 au point 3 en suivant une ligne de teneur en vapeur d'eau constante (verticale), et en augmentant l'enthalpie de Δi_2, avec :

$$\Delta i_2 = \frac{E_2}{m_{\text{air sec}}} = \frac{252\text{kJ}}{100\text{kg}} = 2{,}52\,\text{kJ/kg}$$



Finalement avec ce procédé d'humidification on aboutit à :

nouvelle température de l'air ≈ 17,3 °C
nouvelle humidité relative ≈ 45 %
différence d'enthalpie $(\Delta i_2) = 2{,}52$ kJ/kg