



MELANGE AIR SEC - VAPEUR D'EAU - CONDITIONNEMENT D'AIR

L'air ambiant, mélange d'air sec et de vapeur d'eau, est refroidi par passage sur un échangeur parcouru par un fluide caloporteur (fréon). En se refroidissant, une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air est rejetée et se condense, assèchant ainsi l'air ambiant.

L'installation de conditionnement d'air étudiée comporte trois circuits : un circuit ouvert d'air humide (air ambiant), un circuit fermé de fréon et un circuit ouvert d'eau de refroidissement.

Après stabilisation et à partir de mesures de température, de pression et de débit en différents points de l'installation :

- 1) On caractérisera l'état thermodynamique de l'air humide à l'entrée et à la sortie de la canalisation (fig 1).
- 2) On tracera le cycle parcouru par le fréon dans un diagramme pression - enthalpie.
- 3) On calculera les quantités de chaleur échangées entre les différents circuits.

I. VARIABLES D'ETAT D'UN MELANGE AIR SEC - VAPEUR D'EAU

Une masse M d'air humide homogène est caractérisée par :

- sa température : T .
- son volume : V .
- sa masse volumique $\rho = \frac{M}{V}$
- son volume massique $v = \rho^{-1}$.
- sa pression totale ou absolue : P .
- son nombre total de moles : N .
- les pressions partielles des composants "i" présents : P_i

Le mélange, dans les conditions $P \approx 1$ atm et $T \approx 300^\circ K$, a un comportement de gaz parfait. Il vérifie la loi de Dalton :

$$P = P_{as} + P_{eau}$$

Où P_{as} est la pression partielle de l'air sec et P_{eau} est la pression partielle de la vapeur d'eau.

La composition du mélange peut être définie par différentes variables :

Son titre

Titres Massiques : Y

$$Y_{as} = \frac{M_{as}}{M} \quad , \quad Y_{eau} = \frac{M_{eau}}{M} \quad (Y_{as} + Y_{eau} = 1)$$



Titres Molaires : X

$$X_{as} = \frac{N_{as}}{N}, \quad X_{eau} = \frac{N_{eau}}{N} \quad (X_{as} + X_{eau} = 1)$$

L'air humide est un mélange de gaz parfait. On a donc, si R est la constante des gaz parfaits.

$$\begin{cases} P \cdot V = N \cdot R \cdot T = M \cdot r \cdot T \\ P_{as} \cdot V = N_{as} \cdot R \cdot T = M_{as} \cdot r_{as} \cdot T \\ P_{eau} \cdot V = N_{eau} \cdot R \cdot T = M_{eau} \cdot r_{eau} \cdot T \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} r = R / \mathcal{M} \\ r_{as} = R / \mathcal{M}_{as} \\ r_{eau} = R / \mathcal{M}_{eau} \end{cases} \quad (\mathcal{M}_i : \text{Masses molaires})$$

Nota : A l'équilibre, on peut choisir, par exemple, V comme un ensemble de valeurs d'état indépendantes pour une masse M d'air humide :

$$V = (P, T, Y_{eau})$$

Le système thermodynamique a trois degrés de liberté.

Habituellement, pour de l'air humide, on introduit à la place de la variable d'état Y_{eau} , l'humidité absolue d ou l'humidité relative φ . Mais dans bon nombre d'application, on a pour habitude d'introduire l'humidité absolue ou relative en place du titre.

Son humidité

Humidité Absolue : d

$$d = \frac{\text{Masse de vapeur d'eau contenue dans } 1\text{m}^3 \text{ d'air}}{\text{Masse d'air sec contenue dans } 1\text{m}^3 \text{ d'air}}$$

$$d = \frac{M_{eau}}{M_{a.s.}} \quad d = \frac{r_{as}}{r_{eau}} \cdot \frac{P_{eau}}{P_{as.}} = \frac{r_{as.}}{r_{eau}} \cdot \frac{P_{eau}}{P - P_{eau}}$$

$$d = \frac{M_{eau}}{M - M_{eau}} = \frac{Y_{eau}}{1 - Y_{eau}} \quad \text{d'où :}$$

$$\begin{aligned} Y_{eau} &= \frac{d}{1+d} & \text{et si } d \ll 1 & \text{ alors : } & Y_{eau} &\approx d \\ Y_{air} &= \frac{1}{1+d} & & & Y_{air} &\approx 1 \end{aligned}$$

Humidité Relative : φ

$$\varphi = \frac{M_{eau}}{M_{eau}^S}$$

Où M_{eau}^S est la masse maximale d'eau que l'on peut avoir sous forme de vapeur à la même température T . La pression partielle de l'eau, $P_{eau} = P_s(T)$, est alors appelée pression de vapeur saturante et :

$$P_s(T) \cdot V = M_{eau}^S \cdot r_{eau} \cdot T \quad \text{d'où :} \quad \varphi = \frac{P_{eau}}{P_s(T)} \quad \text{et} \quad d = \frac{r_{a.s.}}{r_{eau}} \cdot \frac{\varphi \cdot P_s(T)}{P - \varphi \cdot P_s(T)}$$



Son enthalpie

L'enthalpie H d'un mélange air sec - vapeur d'eau est la somme de l'enthalpie de l'air sec H_{as} et de l'enthalpie de la vapeur d'eau H_{eau} :

$$H = H_{as} + H_{eau}$$

Enthalpie massique : h

$$M \cdot h = M_{a.s} \cdot h_{as} + M_{eau} \cdot h_{eau}$$

L'enthalpie massique h de l'air humide est donc :

$$h = Y_{a.s} \cdot h_{a.s} + Y_{eau} \cdot h_{eau} \quad \text{et si } d \ll 1 \quad \text{alors :} \quad h \approx h_{as} + d \cdot h_{eau}$$

Enthalpie molaire : \bar{h}

$$N \cdot \bar{h} = N_{as} \cdot \bar{h}_{as} + N_{eau} \cdot \bar{h}_{eau}$$

L'enthalpie molaire \bar{h} de l'air humide est donc :

$$\bar{h} = X_{as} \cdot \bar{h}_{as} + N_{eau} \cdot \bar{h}_{eau}$$

Sa capacité Calorifique

Capacité calorifique massique :

$$Cp = Y_{as} \cdot Cp_{as} + Y_{eau} \cdot Cp_{eau} \quad \text{et si } d \ll 1 \quad \text{alors} \quad Cp \approx Cp_{as} + d \cdot Cp_{eau}$$

Capacité calorifique molaire :

$$Cp^{mol} = X_{as} \cdot Cp_{as}^{mol} + X_{eau} \cdot Cp_{eau}^{mol}$$

Sa masse molaire

Masse molaire de l'air humide :

A partir de la loi de Dalton et des équations d'état écrites antérieurement, en considérant l'air sec, l'air humide et la vapeur d'eau comme des gaz parfaits, il résulte :

$$r = Y_{eau} \cdot r_{eau} + Y_{as} \cdot r_{as}$$

$$\text{Si } d \ll 1 \quad \text{alors :} \quad r \approx d \cdot r_{eau} + r_{as}$$

Connaissant la constante r du mélange air sec-vapeur d'eau, on peut déterminer la masse molaire de l'air humide par la relation :

$$\mathcal{M} = \frac{R}{r}$$

On rappelle également que :

$$Y_{as} = X_{as} \cdot \frac{\mathcal{M}_{as}}{\mathcal{M}} \quad \text{et que} \quad Y_{eau} = X_{eau} \cdot \frac{\mathcal{M}_{eau}}{\mathcal{M}}$$



II. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION (FIG.1)

Circuit d'air

L'air ambiant est envoyé par un ventilateur dans un tube où il est refroidi en passant sur un évaporateur à ailettes. La pression de vapeur saturante diminue avec la température, une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air est rejetée sous forme liquide. L'eau ainsi condensée peut être recueillie et l'air obtenu à la sortie du tube est partiellement ou totalement asséché.

Circuit de fréon

Le circuit de refroidissement de l'air ambiant les quatre éléments principaux d'une installation frigorifique classique : un évaporateur, un compresseur, un condenseur et un détendeur. Le fluide frigorigène est du fréon 22 (monochloro-difluoro-méthane CHF_2Cl)

- Evaporateur à ailettes : L'évaporateur placé dans le tube, est constitué d'un tube de cuivre muni d'ailettes permettant d'augmenter la surface des échanges thermiques.
- Compresseur : Un compresseur à piston d'une puissance de 1 ch est entraîné par un moteur électrique monophasé, alimenté sous 220 V. Ce compresseur comprime le fréon qui à cet endroit de la machine est à l'état gazeux.
- Condenseur : La condensation du fréon est obtenue par un refroidissement produit par une circulation d'eau provenant du réseau. Les tubes de cuivre du fréon et de l'eau sont disposés concentriquement, la circulation de l'eau se faisant par l'extérieur. Les écoulements des fluides sont à contre-courant, afin d'augmenter l'efficacité des échanges thermiques.
- Détendeur : Une détente isenthalpique est obtenue en faisant passer le fréon dans un tube capillaire de longueur appropriée (la chute de pression est obtenue par la perte de charge linéaire).

On notera que le tube conduisant les vapeurs froides de l'évaporateur au compresseur a pour but de réaliser une surchauffe du fréon pour assurer l'état de vapeur à l'entrée du compresseur. A la sortie du condenseur le fréon, en état liquide est sous refroidi afin d'obtenir une plus grande production de froid (voir le diagramme P-h).

Circuit d'eau

Le fréon est refroidi au niveau du condenseur par une circulation d'eau dont le débit est réglé par une vanne.



- Installation de conditionnement d'air -

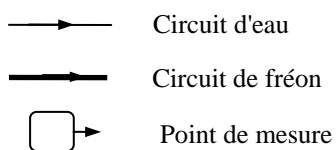
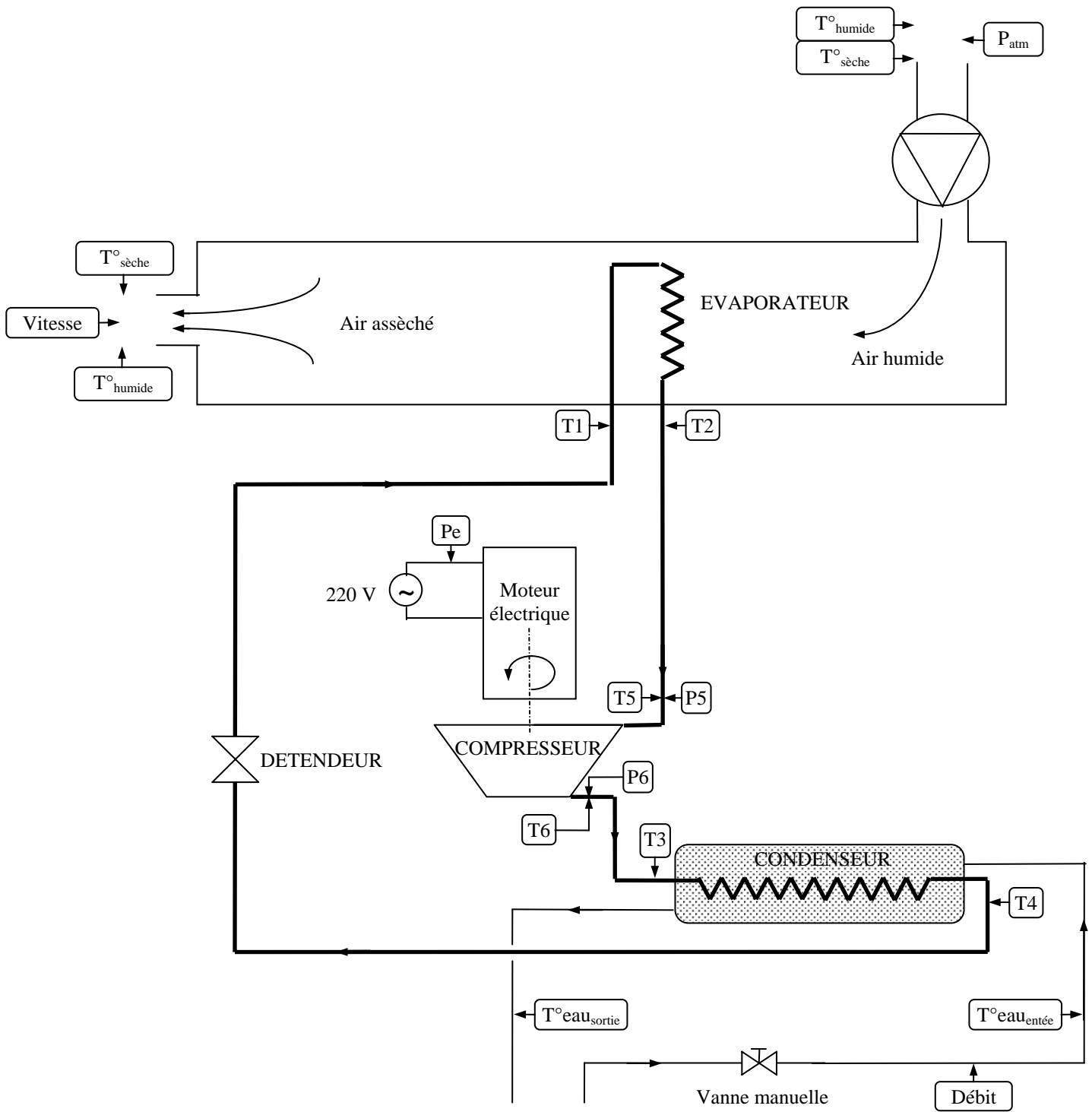


Fig. 1



III. DISPOSITIFS DE MESURES

Eau

- Débit : le débit d'eau de refroidissement est mesuré par un débitmètre (rotamètre). La température d'entrée et de sortie de l'eau est également mesurée grâce à deux thermomètres à bulbe.

Fréon

- Pressions : Les pressions P_5 et P_6 (entrée et sortie du compresseur) sont lues sur deux manomètres à aiguille, indiquant les pressions relatives du fréon (pression par rapport à la pression atmosphérique).

- Températures : Elles sont repérées en 6 points du circuit de fréon par des thermocouples reliés à un enregistreur *MECI* indiquant directement les températures en degrés Celsius. L'enregistreur est muni d'une compensation automatique de soudure froide. Les thermocouples sont à jonction cuivre-constantan.

- Puissance : La consommation électrique du moteur entraînant le compresseur est mesurée par un wattmètre.

Air

- Vitesse : La vitesse moyenne, v , de l'air à la sortie du tube est calculée grâce à un anémomètre et un chronomètre.

- Températures : Les températures sèches et humides sont mesurées à l'entrée et à la sortie du tube au moyen de thermomètres à bulbe. La température dite « sèche » est mesurée par un thermomètre placé dans l'écoulement d'air (température habituellement mesurée). La température dite « humide » correspond à une humidité relative de 100 %. On peut faire apparaître cette humidité maximale autour du thermomètre lorsque l'on entoure celui-ci d'un coton imbibé d'eau. En effet, l'écoulement d'air provoque une évaporation de l'eau saturant ainsi l'air environnant de vapeur d'eau. Cette évaporation entraîne une diminution de température jusqu'à la température humide (point A de la figure 2, $\varphi = 100\%$, $T = T_{humide}$).

En remarquant que l'évaporation dans un écoulement stationnaire est isenthalpique sous certaines conditions, on obtient le point B, caractérisant l'écoulement gazeux, par l'intersection d'une isenthalpique issue du point A (droite inclinée à 135° si $d \ll 1$) et de l'isotherme $T = T_{sèche}$.

Le diagramme de l'air humide permet donc, comme le montre la figure 2, de déterminer l'humidité absolue et l'humidité relative du point B.

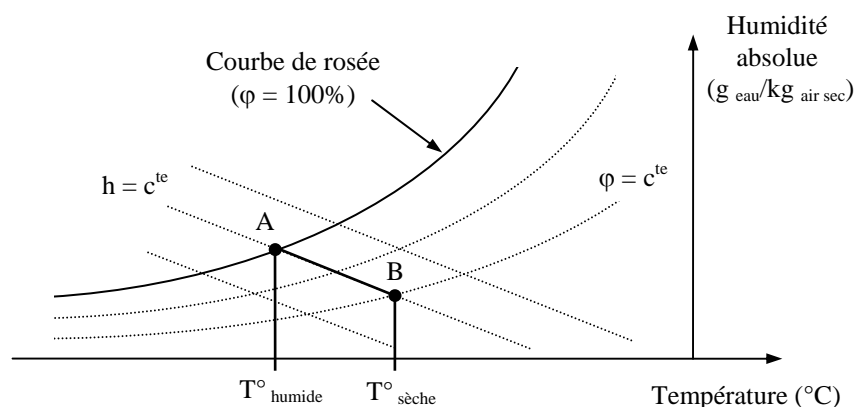


Fig. 2



IV - MODE OPERATOIRE

On met en marche l'installation en commençant par l'enregistreur *MECI*. On ouvre ensuite le robinet d'eau de refroidissement du condenseur, puis on met en route le ventilateur. Le groupe frigorifique est alors prêt à être mis en marche.

V - RESULTATS DEMANDES

Pour un régime thermique stabilité :

1°) A partir du relevé des températures $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ et des pressions P_5 et P_6 , tracer le cycle du fréon dans le diagramme Log P- h.

2°) Remplir le tableau de résultats. Pour cela :

- Déterminer l'humidité relative φ à l'entrée et à la sortie du tube et les humidités absolues correspondantes d à partir du diagramme de l'air humide (figure 4).
- Déterminer la vitesse v à l'aide de l'anémomètre et d'un chronomètre.
- Calculer les titres massiques et molaires de l'eau et de l'air à l'entrée et à la sortie du tube.
- Calculer la masse volumique ρ de l'air ambiant à la sortie du tube à partir de l'équation d'état.
- Calculer le débit massique de l'air, $\dot{m}_a = \rho \cdot S \cdot v$, à la sortie du tube.

3°) Calculer le débit massique du fréon. Celui ci est obtenu en écrivant le bilan énergétique au niveau du condenseur en supposant que la quantité de chaleur cédée par le fréon dans le condenseur se retrouve, sans perte, dans le circuit de l'eau de refroidissement.

Par unité de masse de fréon la quantité de chaleur cédée par le fréon s'écrit :

$$q = h_3 - h_4$$

D'où en terme de puissance :

$$\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot (h_4 - h_3)$$

Par unité de masse d'eau, la quantité de chaleur reçue par l'eau s'écrit :

$$q' = \Delta h_{eau}$$

D'où en terme de puissance :

$$\dot{Q} = -\dot{m}_{eau} \cdot \Delta h_{eau}$$

Si la capacité calorifique massique de l'eau (liquide) est constante dans le domaine compris entre la température d'entrée et de sortie, le débit massique de fréon est :

$$\dot{m}_{fréon} = \dot{m}_{eau} \cdot \frac{Cp_{eau} \cdot (T_{eau_{sortie}} - T_{eau_{entrée}})}{h_3 - h_4}$$



4°) Calculer la quantité de chaleur massique reçue par le fréon dans l'évaporateur à ailettes. En déduire la puissance reçue.

5°) Connaissant le débit d'air humide à la sortie du tube et la masse volumique ρ ayant été calculée par le titre massique, évaluer la quantité d'eau condensée à partir des mesures d'humidité absolue à l'entrée et à la sortie du tube. Le débit d'air sec à la sortie est supposé identique à celui de l'entrée (pas de fuite).

6°) Relever, sur le wattmètre, la puissance consommée par le moteur électrique. Relever le travail du compresseur sur le diagramme du fréon. En déduire la puissance réelle du compresseur et les pertes.

7°) Calculer le rendement isentropique du compresseur, sachant que :

$$\eta_{is} = \frac{W_{is}}{W_c}$$

Avec :

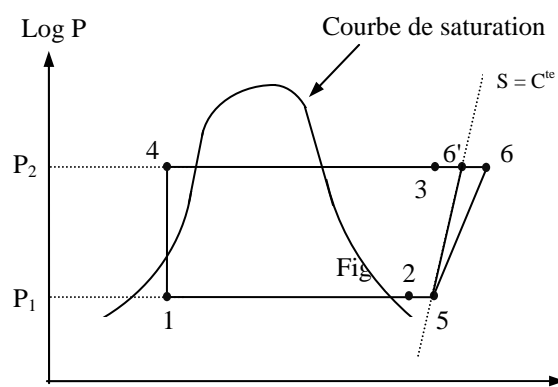
W_c : travail réellement fourni par le compresseur au fréon.

W_{is} : travail nécessaire pour obtenir la même pression finale à partir de la même pression initiale sans irréversibilité et sans échange de chaleur.

Si on admet que la compression réelle est adiabatique et que les effets cinétiques à l'entrée et à la sortie du compresseur sont négligeables, alors (cf figure 3):

$$W_c = \Delta h = h_6 - h_5$$

La compression idéale est adiabatique, sans effet cinétique et sans irréversibilité. On a donc $\Delta S = \Delta_i S + \Delta_e S = 0$. Cette compression est donc isentropique. Le point théorique 6' de fin de compression est alors donné par l'intersection de l'isobare (P_6) et de l'isentropique issue du point 5.



8°) Calculer le coeff quantité de chaleur ϵ cycle. C'est à dire :

$$\epsilon = \frac{q_{1-2}}{w} = \frac{h_2 - h_1}{(h_6 - h_5) + (h_3 - h_4)}$$

omme étant le rapport de la ou rni au fréon au cours du



- Valeurs numériques -

Diamètre de sortie du tube : $D = 100$ mm.

Constante des gaz parfait : $R = 8,314409$ J/mole.K.

Masse molaire de l'eau : $\mathcal{M}_{eau} = 18,016$ g

Constante de la vapeur d'eau : $r_{eau} = 461,5$ J/kg.K.

Constante de l'air sec : $r_{as} = 288,5$ J/kg.K.

Capacité calorifique massique de l'eau liquide : $Cp_{eau} = 4184$ J/kg.K



Nom(s) :

Date :

Pression atmosphérique :

	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)	T4 (° C)	T5 (° C)	T6 (° C)	P5 (bar)	P6 (bar)
Point 1								
Point 2								

	T.Hum entrée (° C)	T.Sèche entrée (° C)	T.Hum sortie (° C)	T.Sèche entrée (° C)	T. eau entrée (° C)	T.eau sortie (° C)	P. élect. (Watt)	Vitesse air (m/s)
Point 1								
Point 2								