

Tour de refroidissement

1 Éléments de théorie

1.1 Les échanges de chaleur par évaporation

Considérons la surface d'une gouttelette ou pellicule d'eau chaude en contact avec un courant d'air. Si l'on suppose que l'eau est plus chaude que l'air, l'eau se refroidira :

- Par rayonnement - Cet effet est très faible dans les conditions normales et peut être négligé.
- Par conduction et convection - ceci dépend de la différence de température, de la surface, de la vitesse de l'air, etc.
- Par évaporation - ceci constitue, de loin, le facteur le plus important. Le refroidissement a lieu lorsque les molécules de H_2O diffusent de la surface dans l'air environnant. L'énergie requise (chaleur latente de vaporisation) pour ce processus est soustraite au liquide restant (cf. Figure 1) ce qui provoque une diminution de l'énergie interne du liquide donc de sa température.

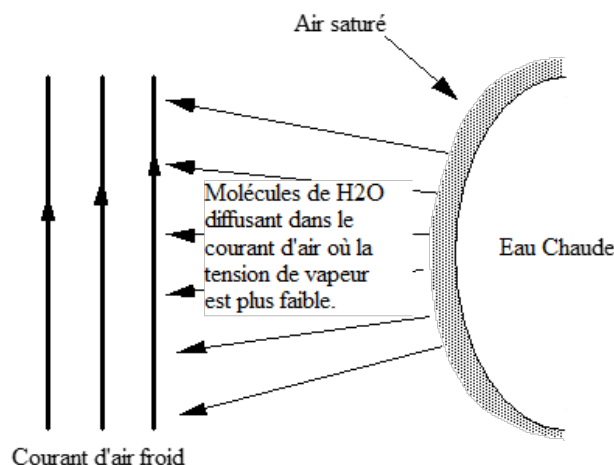


FIGURE 1 – Schématisation des échanges lors de l'évaporation

Le débit d'évaporation depuis une surface mouillée, vers l'air environnant, est déterminé par la différence entre la tension de vapeur à la surface du liquide, c'est-à-dire la pression de saturation correspondant à la température de la surface, et la tension de vapeur dans l'air environnant. Cette dernière dépend de la pression totale de l'air et de son humidité absolue. Dans un espace clos, l'évaporation peut continuer jusqu'à ce que les deux tensions de vapeur soient égales, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'air soit saturé et à la même température que la surface. Toutefois, s'il existe une circulation constante d'air non saturé, la surface mouillée atteindra une température d'équilibre, à laquelle l'effet de refroidissement dû à l'évaporation est égal au transfert de chaleur vers le liquide, par conduction et convection à partir de l'air, qui, dans ces conditions, sera à une température plus élevée. La température d'équilibre atteinte par la surface, dans des conditions adiabatiques est la température du bulbe humide qui est bien connue en hygrométrie.

Dans une tour de refroidissement de dimensions infinies, avec un débit d'air approprié, l'eau quittant la tour serait à la température du bulbe humide d'air d'entrée.

C'est pourquoi la différence entre la température de l'eau quittant la tour et la température locale du bulbe humide est une indication de l'efficacité de la tour de refroidissement. Cette différence de températures est donc l'un des paramètres les plus importants pour l'essai, la spécification, la conception et le choix des tours de refroidissement. Les conditions existant dans un garnissage de tour de refroidissement sont complexes, par suite des variations des températures de l'air, d'humidité et de température de l'eau, lorsque les deux fluides traversent la tour à contre-courant.

Principalement, quatre facteurs affectent les caractéristiques d'une tour de refroidissement :

- La température d'eau (imposée par la charge de refroidissement)
- Le débit d'air
- Le débit d'eau
- Le garnissage de la tour, conditionnant la surface d'échange entre l'eau et l'air

Dans ce TP, nous nous proposons de faire varier uniquement les deux premiers paramètres de façon à obtenir une idée générale des caractéristiques d'une tour de refroidissement.

1.2 Propriétés caractéristiques de l'air humide

1.2.1 Humidité absolue (r) ou teneur en vapeur d'eau de l'air humide

La quantité de vapeur d'eau susceptible d'être contenue dans l'air humide varie avec la température et croît avec celle-ci. La valeur de la teneur en humidité est généralement exprimée en kilogramme de vapeur par kilogramme d'air sec (kg/kg_{as}). Le rapport moléculaire eau/air sec s'écrit $\frac{P_v}{P_t - P_{P_v}}$ avec P_t la pression totale de l'air et P_v la pression partielle de la vapeur d'eau. En appliquant la loi d'état des gaz parfaits à une masse de vapeur m_v , et une masse d'air sec m_{as} , l'humidité absolue $r = \frac{m_v}{m_{as}}$ se transforme en :

$$r = \frac{M_{eau}}{M_{air}} \cdot \frac{P_v}{P_{atmo} - P_v} = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P_{atmo} - P_v} \quad (1)$$

avec $M_{eau} = 18 \text{ g/mol}$ et $M_{air} = 29 \text{ g/mol}$ les masses molaires de l'eau et de l'air, respectivement.

1.2.2 Air saturé

Lorsqu'à une température donnée Θ , la pression partielle de vapeur est égale à la pression de vapeur saturante P_{vs} de l'eau, on dit qu'il y a saturation ou que l'air est saturé. Au-delà, il y a formation de brouillard si $\Theta > 0^\circ C$ est supérieure à $0^\circ C$ ou formation de givre (neige) si $\Theta < 0^\circ C$.

1.2.3 Degré hygrométrique ou humidité relative : ϕ

On définit l'hygrométrie relative ϕ par la relation :

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2)$$

avec :

- P_v la pression partielle de vapeur du mélange atmosphérique en (Pa) ;
- P_{vs} la pression de vapeur saturante à la température Θ .

On notera que ϕ représente un état par rapport à la saturation, donc c'est une fonction implicite de la température Θ . On peut relier ϕ avec l'humidité absolue r par la relation :

$$r = 0.622 \cdot \frac{P_v \cdot \phi}{P_{atmo} - \phi \cdot P_v} \quad (3)$$

Soit :

$$\phi = \frac{r \cdot P_{atmo}}{(r + 0.622) \cdot P_{vs}} \quad (4)$$

1.2.4 Températures

La connaissance de la température usuelle repérée avec un thermomètre ne suffit pas à caractériser l'état particulier de l'air humide. Il faut définir trois températures caractéristiques :

- la température sèche Θ : c'est celle qui est lue sur un thermomètre ordinaire agité dans l'air, à l'ombre et à l'abri de tout rayonnement thermique. On l'appelle aussi température sèche ou température de bulbe sec ;
- la température humide Θ_h : c'est celle que nous indique un thermomètre ordinaire dont le bulbe est recouvert de gaze saturée d'eau et placé dans un flux d'air suffisamment rapide ($v > 1$ m/s) pour assurer une évaporation adiabatique de l'eau. Dans ces conditions, on constate une baisse de température sur le thermomètre, puis une fixation de celle-ci à une valeur Θ_h qui est fonction de la température sèche Θ et de la teneur en vapeur d'eau. On l'appelle aussi température de bulbe humide ;
- la température de rosée Θ_r : c'est celle à laquelle l'air humide refroidi lentement, à humidité absolue constante, arrive à saturation. A cette température un refroidissement de l'air, aussi faible soit il, provoque l'apparition de brouillard qui se dépose sous forme de rosée..

Ces différentes températures peuvent être lues sur le diagramme psychrométrique présenté en ANNEXE.

1.2.5 L'enthalpie spécifique de l'air humide

L'enthalpie spécifique est supposée être zéro au point triple (0,01°C et 0,00611 bar), qui est considéré comme base de référence. L'enthalpie spécifique de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, notée h_v , est donnée par la formule de Rankine :

$$h_v = 2490 + 1.96 \cdot \Theta \quad (5)$$

où h_v est exprimée en kJ/kg_{vap} et Θ est la température sèche en °C. L'expression de l'enthalpie spécifique de l'air sec, notée h_{as} et exprimée en kJ/kg_{as} , est donnée par :

$$h_{as} = C_p \cdot \Delta\Theta \quad (6)$$

où $C_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$ correspond à la chaleur spécifique de l'air et $\Delta\theta$ à la différence de température par rapport à la référence en °C. Cette formule devient donc :

$$h_{as} = \Theta \quad (7)$$

où Θ est exprimée directement en °C. Pour un mélange d'air sec et de vapeur d'eau, l'enthalpie H du mélange a donc pour expression :

$$H = m_{as} \cdot h_{as} + m_v \cdot h_v = m_{as} \cdot \Theta + m_v \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta) \quad (8)$$

c'est-à-dire :

$$H = m_{as} \cdot \left(\Theta + \frac{m_v}{m_{as}} \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta) \right) = m_{as} \cdot (\Theta + r \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta)) \quad (9)$$

avec H exprimée en kJ. En exprimant cette dernière relation par unité de masse d'air sec, on obtient :

$$h = \frac{H}{m_{as}} = \Theta + r \cdot (2490 + 1.96 \cdot \Theta) \quad (10)$$

où h est l'enthalpie spécifique de l'air humide donnée en kJ/kg_{as} .

1.2.6 Volume spécifique de l'air humide

En considérant la vapeur d'eau comme un gaz parfait, on montre que le volume spécifique de l'air humide s'exprime selon la relation suivante :

$$v = 462 \cdot (0.622 + r) \cdot \frac{\Theta}{P_{atmo}} \quad (11)$$

avec :

- v le volume spécifique de l'air humide en m^3/kg_{as} ;
- Θ la température sèche en Kelvin ;
- P_{atmo} la pression atmosphérique en Pascal.

1.2.7 Mesure de l'hygrométrie

Les hygromètres sont des instruments pour mesurer la teneur en eau de l'atmosphère. Il existe de nombreux types d'hygromètres différents, mais notre tour de refroidissement utilise le type bien connu avec bulbes "sec" et "humide" pour lequel un grand nombre de données sont déjà disponibles. Dans cet hygromètre, le bulbe du thermomètre humide est enfermé dans une gaine en tissu mouillée par de l'eau. L'évaporation depuis cette gaine provoque un abaissement de la température indiquée par le thermomètre à bulbe humide, en dessous de celle indiquée par le thermomètre à bulbe sec. L'observation de ces températures, combinée avec les diagrammes, permet de déterminer l'humidité et d'autres propriétés de l'air.

En variante, la pression de la vapeur d'eau dans l'atmosphère peut être obtenue par substitution dans l'équation (due initialement à Regnault, August et Apjohn).

$$p_v = p_{vs} - 6.666 \cdot 10^{-4} \cdot p_{atmo} \cdot (\Theta - \Theta_h) \quad (12)$$

avec :

- p_v la pression partielle de l'eau dans l'air en $mbar$;
- p_{vs} la pression de saturation de la vapeur d'eau à la température du bulbe humide Θ_h en $mbar$;
- P_{atmo} la pression totale de l'air (pression atmosphérique : 1013,25 mbar) ;
- Θ la température sèche de l'air en $^{\circ}C$;
- Θ_h la température du bulbe humide en $^{\circ}C$.

2 Présentation du matériel expérimental

Un schéma de présentation du matériel proposé est présenté en Figure 2. Une photo avec légende est proposée en Figure 3.

2.1 Circuit d'eau

L'eau chaude est pompée depuis le réservoir de charge par la vanne de commande et le débitmètre d'eau, vers la tête de la colonne. Après mesure de sa température, l'eau est répartie uniformément sur les plaques supérieures du garnissage et à mesure qu'elle se disperse sur les plaques, une large et mince pellicule d'eau est ainsi exposée aux courants d'air. Pendant sa descente à travers le garnissage, l'eau se refroidit, essentiellement par suite de l'évaporation d'une faible partie du débit total. L'eau refroidie tombe des plaques inférieures du garnissage dans la cuve d'où elle coule, en passant sur un thermomètre, dans le réservoir de charge où elle est réchauffée avant recirculation. Par suite de l'évaporation, le niveau de l'eau dans le réservoir de charge tend à baisser. Ceci provoque l'ouverture de la vanne à pointeau, commandée par le flotteur, et fait passer de l'eau du réservoir d'eau d'appoint vers le réservoir de charge. Dans des conditions d'équilibre, le débit d'eau sortant du réservoir d'appoint est égal au débit d'évaporation, plus la perte par entraînement de gouttelettes dans l'air évacué.

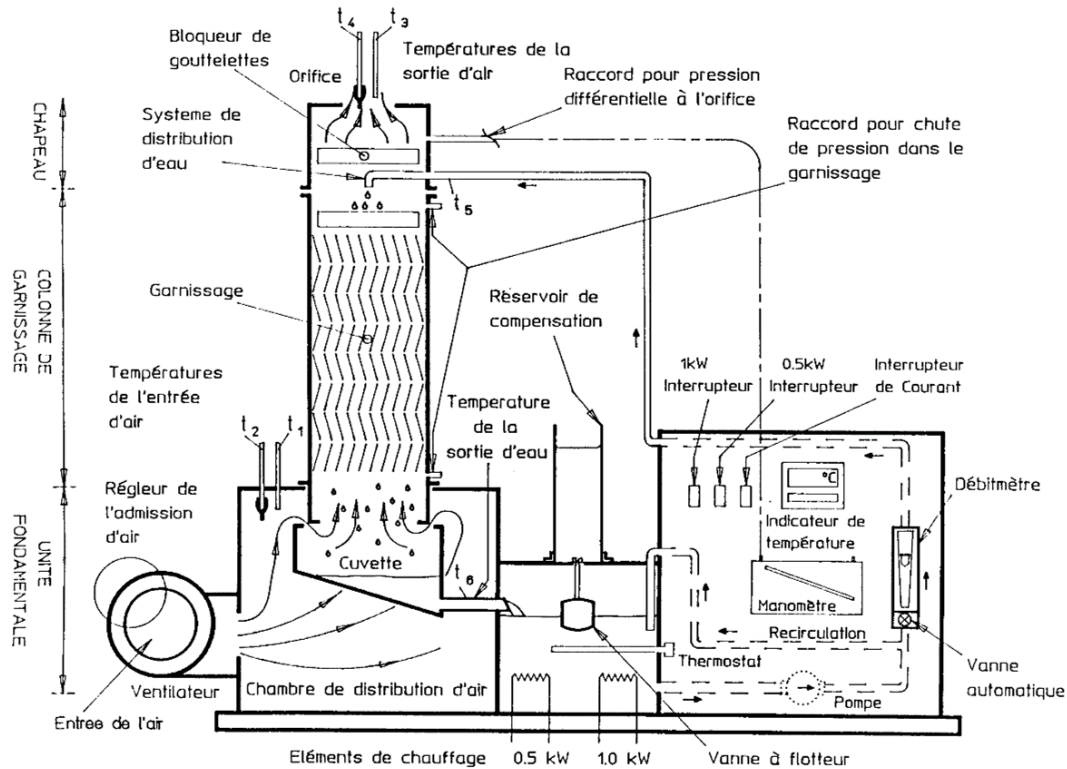


FIGURE 2 – Schéma du banc expérimental utilisé dans cette séance de travaux pratiques : l'air circulant dans la tour de bas en haut évapore une partie de l'eau circulant de haut en bas et refroidit ainsi le reste de celle-ci.

2.2 Circuit d'air

L'air atmosphérique pénètre dans le ventilateur à un débit qui est contrôlé manuellement par le réglage du registre d'entrée (par effet d'obstruction). L'air sortant du ventilateur passe dans la chambre de distribution et sur les thermomètres à bulbes sec et humide, avant de pénétrer dans la colonne garnie. Au cours de la montée de l'air à travers le garnissage, sa teneur en humidité augmente, tandis que l'eau se refroidit. Au moment de quitter la tête de la colonne, l'air passe par un capteur de gouttelettes qui retient la majeure partie des gouttelettes entraînées et les ramène au garnissage. L'air est ensuite évacué à l'atmosphère, par le diaphragme de mesure de débit d'air et en passant sur d'autres thermomètres à bulbes sec et humide. La température du bulbe humide utilisée dans les diagrammes psychrométriques et dans les tableaux, est celle indiquée par un thermomètre à bulbe humide, placé dans un courant d'air, ayant une vitesse de $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ ou plus. Lorsque l'humidité relative est élevée, l'erreur commise est faible même si le thermomètre est placé dans un courant d'air à plus faible vitesse. Néanmoins si l'humidité relative à mesurer est faible, une erreur appréciable peut en résulter. A la sortie de notre tour de refroidissement, les thermomètres sont placés dans de l'air ayant une humidité relative très élevée et où la vitesse de l'air est élevée. La température du bulbe humide indiquée est, par conséquent, très fiable. Le thermomètre à bulbe humide de la chambre à air se trouve dans une zone où la vitesse est plus faible et où l'humidité relative est moindre. Il convient donc de confirmer la lecture au bulbe humide, de la manière suivante :

- i. Détacher le presse étoupe fixant le thermomètre à bulbe humide du dessus de la chambre à air.
- ii. Soulever le thermomètre, jusqu'à ce que l'air s'échappe entre la douille et la gaine. La vitesse de l'air sur la gaine est alors d'environ 10 m/s et la température humide sera vite indiquée par le thermomètre.
- iii. Comparer la lecture de température humide avec la lecture précédente - la discordance éventuelle peut alors être prise en compte lors des observations ultérieures dans les mêmes conditions.

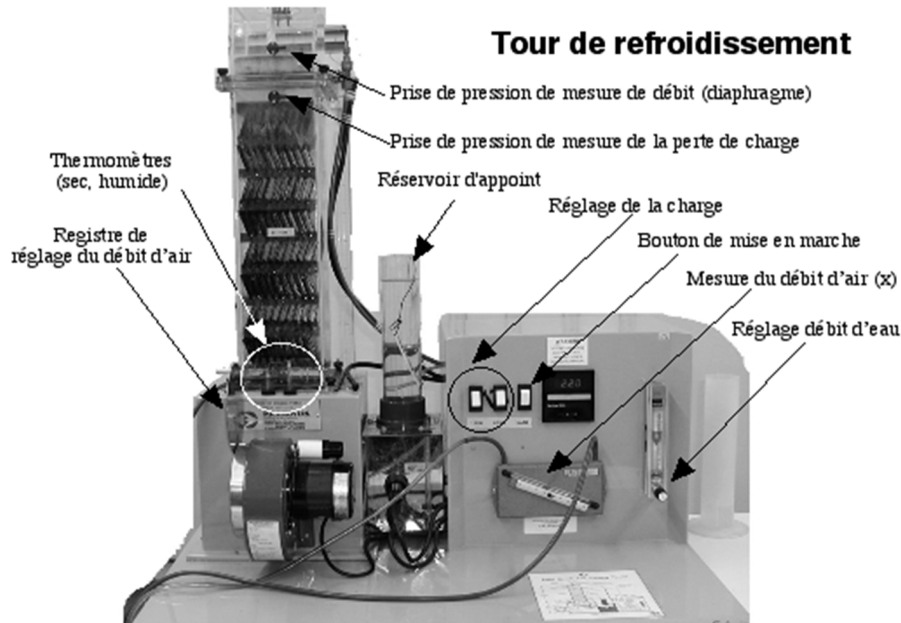


FIGURE 3 – Photographie légendée du banc expérimental

2.3 Procédure de mise en fonction

Le système étant rempli d'eau déminéralisée jusqu'au niveau de fonctionnement normal, le ventilateur est enclenché et le registre d'entrée est réglé de façon à obtenir le débit d'air désiré (indiqué par la pression différentielle du diaphragme). La pompe est enclenchée et le débit d'eau est réglé à la valeur désirée par la vanne située sur le débitmètre. Le mouillage du garnissage provoque la rétention d'une certaine quantité d'eau, si bien que le niveau dans le réservoir de charge diminue légèrement, ce qui provoque l'ouverture de la vanne à flotteur. L'eau sort alors du réservoir d'appoint, jusqu'à ce que le niveau soit rétabli. Le réservoir d'appoint doit être rempli de temps en temps.

Le réservoir ne doit en aucun cas être vide.

Si le niveau est correct on peut imposer une "charge de refroidissement", c'est-à-dire des éléments de chauffe dans le réservoir, dont la puissance s'échelonne de 0,5 kW à 1,5 kW.

2.4 Procédure de mise à l'arrêt

Pour arrêter le système, il faut :

1. Couper tous les éléments de chauffe ;
2. Après environ 2 minutes, couper toutes les alimentations de courant.

2.5 Informations utiles

Les informations techniques relatives à la mesure du débit d'air, aux sections de passage etc ... sont disponibles en annexe à la fin de ce document.

3 Bilans massiques et thermiques appliqués au système

Des bilans massiques et thermiques vous seront demandés dans plusieurs configurations. Avant d'effectuer ces bilans, il convient de définir le système à proprement parler. On peut définir plusieurs systèmes en fonction de l'instrumentation que l'on souhaite utiliser. Ainsi on peut définir :

- un système F dit fermé (cf. Figure 4-a) constitué par tout le châssis du banc expérimental ;

- un système O dit ouvert (*cf.* Figure 4-b) constitué par la tour seule.

Les bilans d'énergie et de masse doivent être effectués à l'aide des grandeurs directement mesurables sur la boucle : débits, températures. Le diagramme psychrométrique permettra d'obtenir des informations sur les grandeurs liées à l'air humide aux points A et B (notamment l'obtention de r et h). Bien entendu, toutes les grandeurs doivent être mesurées lorsque le système est en régime permanent. On peut s'en assurer en visualisant par exemple la température de l'eau à l'entrée de la tour.

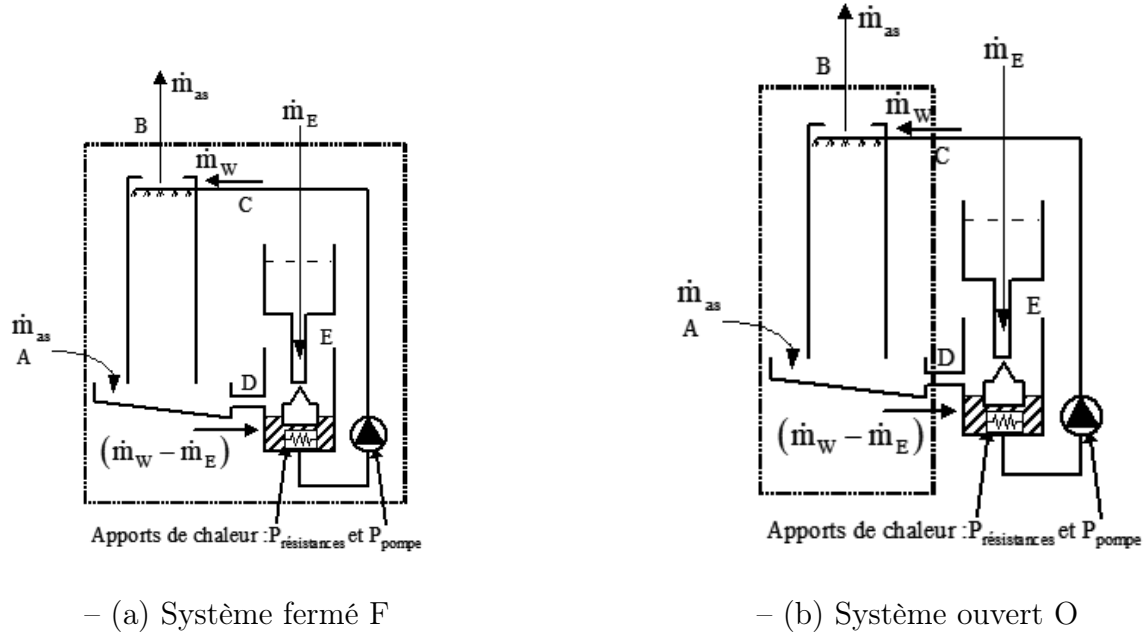


FIGURE 4 – Schématisation des entrées/sorties du système ouvert O et du système fermé F (pointillés)

3.1 Bilan de masse

Le débit massique d'air sec (\dot{m}_{as}) à travers une tour de refroidissement est une constante, tandis le débit massique d'air humide augmente par suite de l'évaporation d'une partie de l'eau. La conservation de la masse, en régime permanent, implique que le débit massique d'air sec et de l'eau (sous forme de liquide ou de vapeur) soit le même à l'entrée et à la sortie du système. Par conséquent on va chercher à relier les entrées/sorties en masse de l'eau sous forme liquide ou vapeur selon la formule :

$$\sum_{entrees} \dot{m}_{eau} = \sum_{sorties} \dot{m}_{eau} \quad (13)$$

L'humidité absolue r est connue pour les points de condition initiale (point A) et finale (point B) sur le diagramme psychrométrique dès la connaissance des températures sèches et humides. On peut donc définir un débit de vapeur d'eau selon la formule suivante : $(\dot{m}_v)_A = \dot{m}_{as} \cdot r_A$ et $(\dot{m}_v)_B = \dot{m}_{as} \cdot r_B$. Les débits de vapeur ainsi que \dot{m}_E seront à comparer dans un bilan de masse car chacune peut être mesurée indépendamment de l'autre.

3.1.1 Bilan d'énergie pour le système fermé (F)

Pour le système F représenté par la ligne pointillée (*cf.* Figure 4-a), la chaleur est transférée au niveau du réservoir de charge, c'est à dire la charge due à l'opération industrielle et éventuellement, dans une faible mesure, au milieu ambiant. Sur notre installation, les puissances apportées sont : la puissance thermique P_p transférée par la pompe et la puissance P_r des résistances chauffantes. Ces deux variables doivent être intégrées dans un bilan faisant intervenir les fluides entrant/sortant du système « F », à savoir : l'air à faible humidité (point d'entrée en A), l'air à humidité élevée (point de sortie en B) et l'eau liquide d'appoint (point d'entrée en E). Le bilan d'énergie dit du Système fermé

peut se résumer sous la forme d'une équation faisant intervenir le débit enthalpique et les puissances P_p et P_r dans une équation du type :

$$\sum_{\text{entres}} \dot{H} + \sum_{\text{entres}} P = \sum_{\text{sorties}} \dot{H} \quad (14)$$

Le débit enthalpique \dot{H} peut être défini comme le produit de l'enthalpie spécifique et du débit de fluide considéré \dot{m} soit : $\dot{H} = \dot{m} \cdot h$. Sa dimension est celle d'une puissance.

3.2 Bilan d'énergie pour le système ouvert (O)

Le système peut être redéfini comme indiqué à la Figure 4-b. Dans ce cas, la chaleur de la transformation et le travail de la pompe ne traversent pas la limite du système, mais il y a maintenant de l'eau chaude qui pénètre dans le système (au point C) et de l'eau refroidie qui le quitte (au point D). Si l'on applique le bilan d'énergie en régime permanent sur le système ouvert (pointillés) ouvert, on doit obtenir :

$$\sum_{\text{entres}} \dot{H} = \sum_{\text{sorties}} \dot{H} \quad (15)$$

Expérimentalement on peut constater une différence, essentiellement à cause des transferts de chaleur entre l'appareil et le milieu environnant. Cet essai permet de comparer la fiabilité de l'instrumentation sur l'air humide et celle sur l'eau et d'évaluer les pertes de chaleur par les parois de la tour.

4 Travail préliminaire

4.1 Propriétés de l'air humide

Sous une pression totale de 1,013 bar avec des températures au bulbe sec et au bulbe humide, respectivement de 20 °C et 14 °C, déterminer :

- l'enthalpie spécifique (relative à 0,01 °C) ;
- le volume spécifique ;
- la teneur en humidité de l'air.

On utilisera ici les lois définies par les équations du paragraphe 1 ainsi que la table thermodynamique de l'eau donnée en annexe à la fin de ce texte.

4.2 Diagramme psychrométrique

Les calculs effectués ci-dessus sont plutôt fastidieux, et il est généralement bien plus commode d'utiliser un diagramme psychrométrique pour la pression atmosphérique appropriée. Un diagramme est donné en ANNEXE, dont la première page présente un résumé des différentes variables que l'on peut en déduire. Si on utilise les données du paragraphe précédent, c'est-à-dire une température sèche de 20 °C, une température au bulbe humide de 14 °C, une pression totale égale à 1,013 bar, l'enthalpie spécifique, le volume spécifique et l'humidité absolue peuvent être obtenus facilement.

1. Retrouver et placer ce point sur le diagramme psychrométrique ;
2. Comparer à celles obtenues précédemment, les variables suivantes :
 - l'enthalpie spécifique ;
 - le volume spécifique ;
 - l'humidité relative de l'air.

5 Manipulations à effectuer

On se propose d'agir sur les différents paramètres pouvant influencer sur les performances d'une tour de refroidissement. Nous examinerons successivement les points suivants :

1. Détermination des propriétés de l'air et de l'eau à partir des diagrammes et des tables afin d'établir les bilans d'énergie et de masse.
2. L'effet de la charge de refroidissement sur les conditions de sortie de l'eau
3. L'effet de la vitesse de l'air en entrée et influence sur la pression au sein de la tour.
4. Le rapport entre la charge de refroidissement et la gamme de refroidissement.

ATTENTION : Le manomètre de mesure (en mm de colonne d'eau) n'est peut-être pas à 0 lorsque le débit est nul, il faudra donc tenir compte de cette valeur à débit nul et interpréter le "Différentiel de pression" comme une différence et non pas une valeur absolue.

5.1 Diagrammes et tables - Bilans d'énergie et de masse

5.1.1 Détermination de l'apport de chaleur (P_p) de la pompe

Avant d'effectuer toutes ces manipulations il faut déterminer l'apport P_p d'énergie du circulateur intervenant dans le bilan du système fermé (cf. § 3.1.2). Pour cela mettre en route la tour avec les conditions suivantes :

- Différentiel de pression x : débit max ($\sim 16 \text{ mm}_{CE}$);
- Débit d'eau : 40 g.s^{-1} ;
- Pas de charge de refroidissement (0 kW).

Une fois le régime permanent atteint (environ une dizaine de minutes!), effectuer un relevé des paramètres expérimentaux permettant de déterminer P_p selon un bilan d'énergie du système fermé avec $P_r = 0$. Le débit massique d'air sec \dot{m}_{as} est déterminé à partir de la mesure de pression différentielle x et de l'équation d'étalonnage proposée en Annexe (Informations utiles). Le débit d'eau d'appoint \dot{m}_E est obtenu de la façon suivante. En régime permanent, il faut remplir le réservoir de réserve jusqu'au repère, au moyen d'eau déminéralisée. Après un certain temps mesuré à l'aide d'un chronomètre, il faut remplir à nouveau ce réservoir, à partir d'une quantité d'eau distillée connue, contenue dans une éprouvette graduée. Par différence, on peut déterminer le volume d'eau d'appoint qui a été fourni pendant un intervalle de temps déterminé ce qui conduit au calcul de m_E . On peut également obtenir la puissance de la pompe à partir des mesures effectuées sur le circuit d'eau uniquement. Il faut pour cela 'mélanger' les bilans d'énergie obtenus avec les systèmes ouvert et fermé. Comparez ce calcul au résultat précédent. Conclusion ?

5.1.2 Bilans de masse et d'énergie

La tour de refroidissement doit être maintenant laissée en fonctionnement dans les conditions proposées suivantes :

- Différentiel de pression : débit max ($\sim 16 \text{ mm}_{CE}$)
- Débit d'eau : 40 g.s^{-1}
- Charge de refroidissement : 1.0 kW Au régime permanent effectuer un relevé sur une colonne du tableau de mesure pour cet essai.
- Placer sur le diagramme psychrométrique les points d'entrée et de sortie de la tour.
- Par rapport aux systèmes décrits au paragraphe 3, établir les bilans d'énergie relatifs aux systèmes ouvert et fermé en tenant compte maintenant de la charge de refroidissement.
- Appliquer ces bilans aux relevés expérimentaux et comparer les valeurs calculées à celles mesurées directement. Ici on utilisera les données de P_r (1000 W) et P_p . Conclusions.
- Effectuer le bilan massique sur l'eau et comparer la valeur obtenue de \dot{m}_E à la mesure directe.
- Conclusions

5.2 Effets de la Charge de Refroidissement sur les conditions de sortie

5.2.1 Essais

Dans cette partie, les paramètres à garder constants sont :

- Débit d'eau : 40 g.s^{-1}
- Différentiel de pression : débit max ($\sim 16 \text{ mm}_{CE}$)

L'objet de cette partie est de faire varier la charge de refroidissement. Dans la mesure où les essais avec une charge de refroidissement de 0 kW et 1 kW ont déjà été effectués, effectuer les essais avec les autres charges restantes disponibles sur l'appareil. Dans chaque cas, lorsque le régime permanent est atteint, on effectue un relevé complet de toutes les grandeurs.

5.2.2 Exploitation des mesures

- Placer les différents points sur le diagramme psychrométrique, commenter le déplacement des points.
- Tracer $(\theta_D - \theta_{ah})$ (ou encore $\theta_6 - \theta_2$) en fonction de la charge de refroidissement
- Peut-on refroidir l'eau à une température inférieure à celle de l'air à l'entrée de la tour ?
- Commentaires et conclusions. A partir de cette courbe, peut-on définir parfaitement les conditions de fonctionnement d'une tour de refroidissement, i.e. à partir d'une puissance à évacuer peut-on définir un point de fonctionnement lorsque Θ_2 est fixée par les conditions climatiques externes ?

5.3 Effet de la vitesse de l'air

5.3.1 Essais

Dans cette partie, les paramètres à garder constants sont :

- La charge de refroidissement de 1,0 kW ;
- le débit d'eau est de 40 g.s^{-1} .

L'objet de cette partie est de faire varier la vitesse du vent, c'est-à-dire la différence de pression au diaphragme. Pour cela, vous prendrez successivement les valeurs suivantes : $x = 12 \text{ mm}_{CE}$, $x = 8 \text{ mm}_{CE}$, $x = 4 \text{ mm}_{CE}$ (L'essai correspondant à $x = 16 \text{ mm}_{CE}$ a déjà été effectué à ce stade). A nouveau, effectuer des relevés de mesures en régime permanent dans chaque cas.

5.3.2 Exploitation des mesures

En prenant comme abscisse la vitesse de l'air dans la tour calculée à partir du débit massique et de la section de la tour (cf. Annexe/Informations utiles), on tracera sur un graphique à "double axe des ordonnées" les courbes :

- de perte de charge dans la colonne (en mm CE) ;
- de différence de température $(\theta_D - \theta_{ah})$ (ou encore $(\theta_6 - \theta_2)$).

Attention : étant donné le faible nombre de points (4) veillez à ne pas dilater les échelles de façon exagérée et à lisser vos courbes.

N.-B. : Pour mesurer la perte de charge à travers les garnissages, il est nécessaire de déconnecter temporairement le tube en plastique du point de prise de pression du diaphragme. Le tube doit être reconnecté au point de prise de pression situé juste en dessous du garnissage et un autre tube doit être connecté entre la prise droite du manomètre et le point de prise de pression située au-dessus des garnissages.

- Conclusions sur les limites d'utilisation d'une tour de refroidissement ;

- Conclusions sur une éventuelle optimisation entre les coûts de fonctionnement et d'équipement. Y a-t-il un optimum ?
- A partir de cette courbe et de celle du §5.2, peut-on définir parfaitement les conditions de fonctionnement de la tour, i.e. quelle est la variable d'ajustement lorsque puissance (Pr) et température humide à l'entrée sont fixées ?

5.4 Rapport entre la charge de refroidissement et la gamme de refroidissement

Dans cette partie, aucun essai supplémentaire n'est demandé. Avec comme axe des abscisses la charge de refroidissement, on tracera sur un même graphique :

- La température de l'eau entrant (Θ_5), la température de l'eau quittant la tour (Θ_6) ;
- La température moyenne de l'eau $(\Theta_5 + \Theta_6)/2$
- La différence de température d'eau entrée - sortie ($\Theta_5 - \Theta_6$) ;
- Conclusions sur l'évolution de la température moyenne, cette évolution était elle prévisible ?
- Conclusion générale sur l'utilisation industrielle d'une tour de refroidissement ;
- Qu'apporteraient des mesures à l'intérieur de la tour pour sa caractérisation ?

A Annexes

A.1 Présentation d'un tableau de mesure

- Ligne 1 : type de garnissage installé ;
- Ligne 2 : densité de garnissage (*cf.* notice technique ou colonne) ;
- Ligne 3 : Θ_1 température sèche de l'air à l'entrée en °C (Θ_A) ;
- Ligne 4 : Θ_2 température au bulbe humide de l'air à l'entrée en °C (Θ_{Ah}) ;
- Ligne 5 : Θ_3 température sèche de l'air à la sortie en °C (Θ_B) ;
- Ligne 6 : Θ_4 température au bulbe humide de l'air à la sortie en °C (Θ_{Bh}) ;
- Ligne 7 : Θ_5 température de l'eau à l'entrée en °C (Θ_C) ;
- Ligne 8 : Θ_6 température de l'eau à la sortie en °C (Θ_D) ;
- Ligne 9 : Θ_E température de l'eau d'appoint en °C (Θ_E) ;
- Ligne 10 : x différentiel de pression au diaphragme de sortie en mm_{CE} ;
- Ligne 11 : \dot{m}_W : débit d'eau en $g.s^{-1}$;
- Ligne 12 : puissance de refroidissement aux résistances électriques en kW ;
- Ligne 13 : quantité d'eau d'appoint en litres ;
- Ligne 14 : intervalle de temps en s pour la mesure de \dot{m}_E ;
- Ligne 15 : chute de pression à travers le garnissage en mm_{CE} ;

N.-B. : En fonction de l'essai demandé certains calculs ne sont pas nécessaires.

A.2 Nomenclature

Symboles	Quantité	Unité
c_p	Chaleur Spécifique ($\partial h / \partial \theta$)	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
h	Enthalpie Spécifique	$J.kg^{-1}$
H	Enthalpie = $m \cdot h$	J
\dot{H}	Enthalpie par unité de temps = $\dot{m} \cdot h$	W
m	Masse	kg
\dot{m}	Débit massique	$kg.s^{-1}$
M	Masse Molaire	$kg.mol^{-1}$
p	Pression	Pa ou mm_{CE}
P	Puissance thermique, électrique	W
R	Constante des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
Θ	Température (Celsius)	$^{\circ}C$
T	Température (Absolue)	K
v	Volume Spécifique	$m^3.kg^{-1}$
x	Différentiel de pression au diaphragme	mm_{H_2O}
r	Humidité Spécifique	$kg.kg_{as}^{-1}$
ϕ	Humidité Relative	$\%$
Δ	Variation Finie	

Indices	Grandeur ou point	Mesures
A	Air à l'entrée à la base de la colonne	Θ_1 et Θ_2
B	Air à la sortie en tête de la colonne	Θ_3 et Θ_4
C	Eau à l'entrée en tête de la colonne	Θ_5
D	Eau à la sortie de la cuve	Θ_6
E	Eau dans le réservoir d'appoint	Θ_E
sans suffixe	Bulbe sec	
h	Bulbe humide	
v et vs	Vapeur d'eau et vapeur d'eau à saturation	
as	Air sec	
t	Total	

A.3 Tables thermodynamiques de l'eau : liquide et vapeur saturés (extrait)

T (K)	P (kPa)	v_l (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	h_l (kJ/kg)	L_v (kJ/kg)	v_g (kJ/kg)	s_l (kJ/(kg.K))	s_g (kJ/(kg.K))
273.16	0.6113	0.001	206.1	0	2500.9	2500.9	0	9.1555
275	0.698	0.001	181.7	7.5	2496.8	2504.3	0.0274	9.1066
280	0.9912	0.001	130.3	28.1	2485.4	2513.5	0.1015	8.978
285	1.388	0.001001	94.67	48.8	2473.9	2522.7	0.1749	8.8552
290	1.919	0.001001	69.67	69.7	2462.2	2531.9	0.2475	8.7378
295	2.62	0.001002	51.9	90.7	2450.3	2541	0.3193	8.6254
300	3.536	0.001004	39.1	111.7	2438.4	2550.1	0.39	8.5179
305	4.718	0.001005	29.78	132.8	2426.3	2559.1	0.4598	8.4149
310	6.23	0.001007	22.91	153.9	2414.3	2568.2	0.5285	8.3163
315	8.143	0.001009	17.8	175.1	2402	2577.1	0.5961	8.2216
320	10.54	0.001011	13.96	196.2	2389.8	2586	0.6626	8.1308
325	13.53	0.001013	11.04	217.3	2377.6	2594.9	0.728	8.0436
330	17.21	0.001015	8.809	238.4	2365.3	2603.7	0.7924	7.9599
335	21.71	0.001018	7.083	259.4	2353	2612.4	0.8557	7.8793
340	27.18	0.001021	5.737	280.5	2340.5	2621	0.918	7.8018
345	33.77	0.001024	4.68	301.5	2328	2629.5	0.9793	7.7272
350	41.66	0.001027	3.844	322.5	2315.4	2637.9	1.0397	7.6553
355	51.05	0.00103	3.178	343.4	2302.9	2646.3	1.0991	7.586
360	62.15	0.001034	2.643	364.4	2290.1	2654.5	1.1577	7.5192
365	75.21	0.001037	2.211	385.3	2277.3	2662.6	1.2155	7.4546
370	90.47	0.001041	1.86	406.3	2264.3	2670.6	1.2725	7.3923
375	108.2	0.001045	1.573	427.3	2251.2	2678.5	1.3288	7.332
380	128.8	0.001049	1.337	448.3	2237.9	2686.2	1.3843	7.2737

A.4 Autres informations utiles

1. Constante de diaphragme pour la mesure du débit d'air. Le débit massique d'air sec est donné par la formule ($K = 0.0137 \text{ SI}$) :

$$\dot{m}_{as} = K \cdot \sqrt{\frac{x}{(1 + r_b) \cdot v_{aB}}} \quad (16)$$

et :

$$\dot{q}_{vB} = \dot{m}_{as} \cdot v_{aB} \quad (17)$$

soit si on néglige r_B devant 1 :

$$\dot{m}_{as} = K \cdot \frac{\sqrt{x}}{\sqrt{v_{aB}}} \quad (18)$$

et :

$$\dot{q}_{vB} = K \cdot \sqrt{x} \cdot \sqrt{v_{aB}} \quad (19)$$

avec :

- \dot{m} le débit massique d'air sec ($kg.s^{-1}$), q_{vB} le débit volumique d'air sec ($m^3.s^{-1}$) ;
- x la différence de pression (mm CE) au diaphragme ;
- v_{aB} le volume spécifique de l'air sec quittant le sommet de la colonne ($m^3.kg^{-1}$) ;
- r_B la teneur en humidité de l'air sec quittant la colonne ($kg.kg_{as}^{-1}$)

2. Puissance transférée à l'eau par la pompe de l'ordre de 100 W (à vérifier lors du premier essai)
3. Dimensions de la colonne : 150 mm x 150 mm x 600 mm de hauteur ;
4. Caractéristiques des garnissages

Colonne	B
Nombre de plaques par couche rangée	10
Surface totale du garnissage (m^2)	1,19
Hauteur de garnissage (m)	0,48
Densité de garnissage surface/volume (m^{-1})	110

5. Constantes

- Chaleur spécifique de l'eau (c_p) : $4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$
- Chaleur spécifique de l'air (c_{pas}) : $1,005 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$
- Pour l'air, $M = 9 \text{ g.mol}^{-1}$ Pour la vapeur (H_2O), $M = 18 \text{ g.mol}^{-1}$
- Constante des gaz parfaits : $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$
- Température de référence pour le calcul des enthalpies : $\Theta_0 = 0,01 \text{ } ^\circ C$

A.5 Diagramme psychrométrique

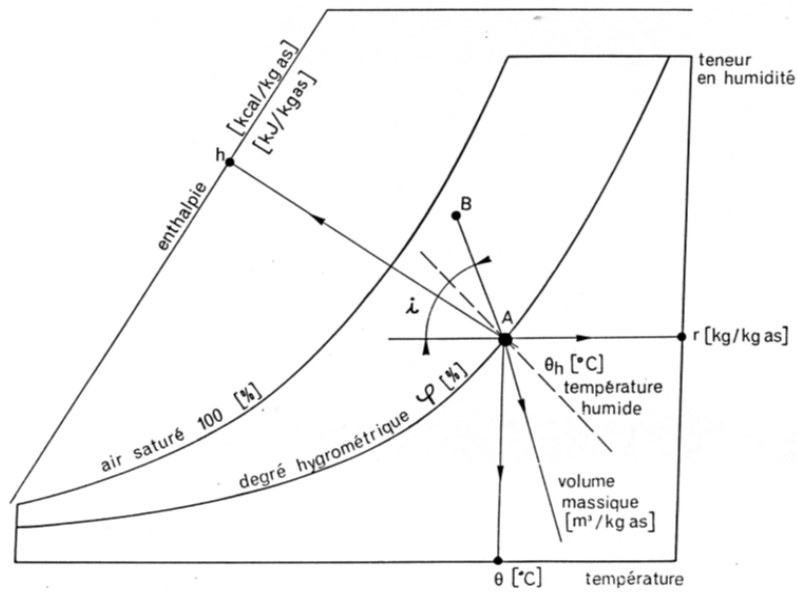


DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

PRESSION ATMOSPHERIQUE NORMALE 101300 [Pa]

