

Tour de refroidissement



ENSEEIHT
2, rue Charles CAMICHEL
B.P. 7122
31071 TOULOUSE Cedex 7
FRANCE



(33) 05 61 58 82 00

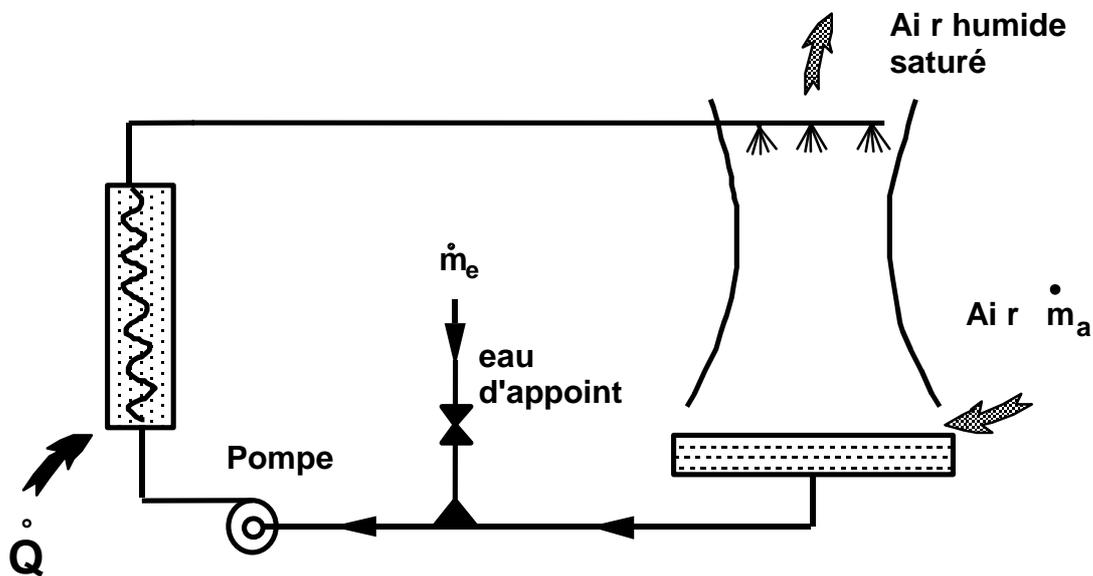


(33) 05 61 62 09 76

Tour de refroidissement

Dans le cycle de la vapeur, le fluide à l'état de vapeur en sortie de la turbine est refroidi dans un échangeur de chaleur (condenseur). La source froide est soit l'eau d'une rivière, soit l'air extérieur. On parle alors de tour de refroidissement atmosphérique.

Le principe de fonctionnement d'une tour est rappelé sur le schéma ci-dessous. La chaleur \dot{Q} évacuée au condenseur est transférée à un circuit d'eau. Le refroidissement de l'eau est obtenu par évaporation partielle dans la tour. L'eau est pulvérisée à contre courant dans un écoulement d'air humide non saturé (air atmosphérique) puis est rejeté à l'état d'air humide saturé qui est à une température supérieure à celle de l'air admis. L'eau refroidie retourne au condenseur par l'intermédiaire d'une pompe. Un faible complément d'eau est nécessaire pour compenser la vapeur d'eau rejetée au sommet de la tour. L'écoulement d'air est obtenu soit par convection libre soit par forçage par des ventilateurs.

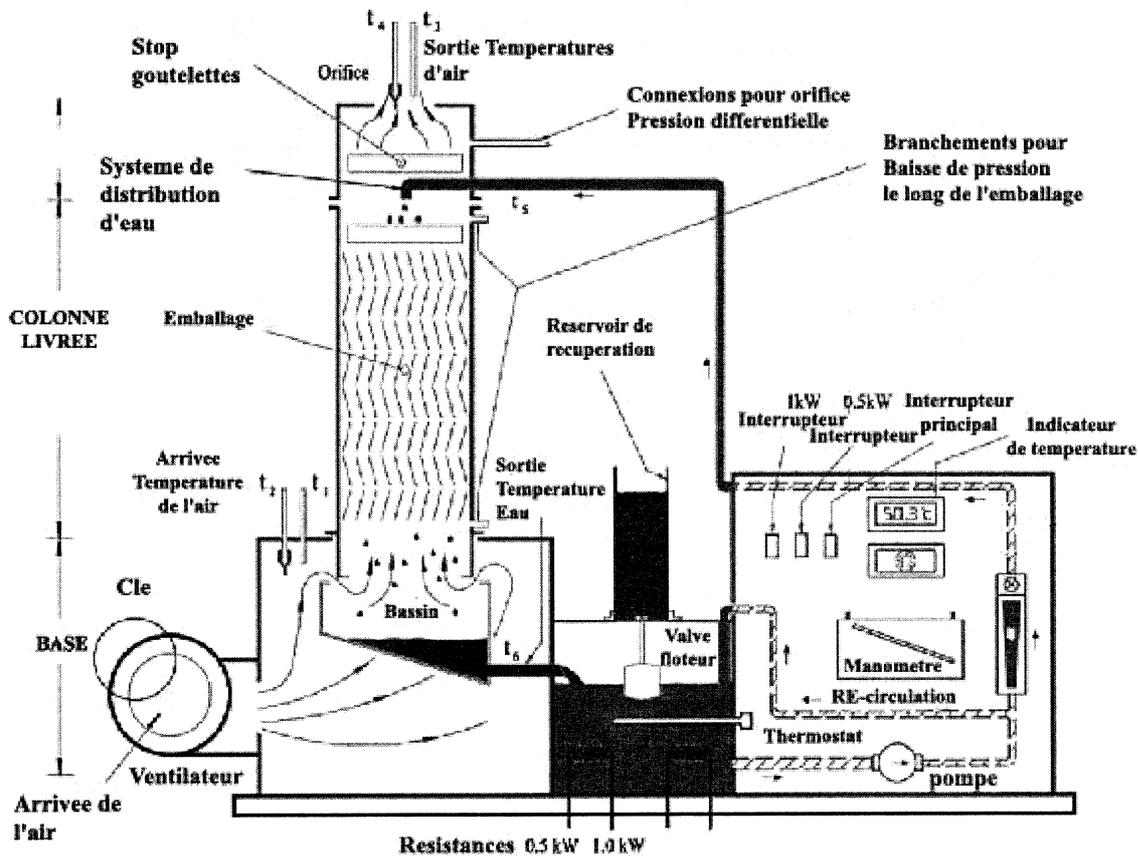


La colonne de refroidissement Hilton ($0,15 \times 0,15 \times 0,6 \text{ m}^3$) a été conçue pour donner des caractéristiques proches des tours de refroidissement industrielles. Elle est complètement autonome. Elle comporte une charge de chauffage (\dot{Q}) simulée par des résistances chauffantes et une pompe de circulation d'eau.

Description :



COLONNE DE REFROIDISSEMENT SUR BASE H892



Circuit d'eau

L'eau chauffée par les résistances chauffantes de puissances 0,5 kW, 1 kW ou 1,5 kW est pompée du réservoir de charge (3 litres) vers le sommet de la colonne. La régulation et le choix du débit d'eau se fait au moyen de la vanne automatique et du débitmètre à flotteur. L'eau est alors uniformément distribuée sur l'étage de garnissage supérieur et se répand en fines pellicules d'eau sur les plateaux inférieurs pour augmenter la surface d'échange avec l'écoulement d'air. L'eau refroidie chute des étages inférieure vers une cuvette réceptrice puisse dans le réservoir de charge.

A cause de l'évaporation, le niveau dans le réservoir baisse. Cela provoque l'ouverture d'une vanne à pointeau associée à un flotteur qui permet de conserver un niveau constant par un apport d'eau provenant du réservoir de compensation.

Circuit d'air

L'air atmosphérique pénètre dans le ventilateur et passe dans la tour de refroidissement. Au sommet de la colonne un récupérateur de gouttelettes piège la plupart des gouttelettes entraînées par l'air.

Le débit d'air peut être ajusté par le réglage d'une plaque pivotante en entrée du ventilateur. Le débit d'air peut être estimé en sortie au moyen d'un orifice en paroi mince de 80 mm de diamètre, préalablement calibré.

Mesure de la température et de l'humidité relative.

La température de l'eau est mesurée par deux thermocouples situés en entrée (sommet de la colonne) et en sortie de celle-ci (cuvette réceptrice) permettent de déterminer la puissance thermique évacuée par la tour.

Pour l'air la méthode des deux températures est utilisée pour connaître à la fois la température de l'écoulement et l'humidité relative. On a donc disposé deux thermocouples au niveau de l'entrée d'air et en deux autres en sortie. Le thermocouple simple donne la température réelle de l'écoulement d'air (dite température sèche). Le second thermocouple est enrobé de coton humidifié en permanence par un petit réservoir rempli d'eau) et donne la température humide.

Les températures sont relevées sur l'indicateur six points directement en °C.

Données et informations utiles.

Mesure du débit d'air :

La loi d'étalonnage de l'orifice de sortie au sommet de la colonne est donnée par la

$$\text{formule : } \dot{m}_a = 0,0137 \sqrt{\frac{\Delta h}{v_m}}$$

Δh : Lecture de la déviation du manomètre en mm de H₂O.

v_m : Volume massique du mélange air- vapeur d'eau $v_m = v_a + x v_v$

Avec x l'humidité absolue, v_a le volume massique de l'air et

v_v : Volume massique de la vapeur d'eau On montrera que $\frac{v_v}{v_a} = \frac{M_a}{M_e}$

Masse molaire et de l'eau exposant isentropique : γ

Pour la vapeur d'eau : $M_e = 18 \text{ g/mole}$ et $\gamma = 1,33$

Pour l'air : $M_e = 29 \text{ g/mole}$ et $\gamma = 1,40$

Mesure du débit d'eau :

Lecture directe sur le débitmètre à flotteur : \dot{m}_e (g/s)

Mesure de la pression :

Elle se mesure par rapport à la pression directement en mm de H₂O. Le bouchon de protection doit naturellement être enlevé pour obtenir la référence de la pression atmosphérique. On positionne l'autre extrémité soit à la prise de pression en bas de colonne ($p_E, \Delta h_E$) puis en haut de colonne ($p_S, \Delta h_S$).

Puissance de chauffe (charge de refroidissement):

Elle se sélectionne directement. On peut obtenir trois puissance de chauffe : 0,5 kW, 1 kW ou 1,5 kW. De plus la pompe délivre une puissance de l'ordre de 100 W.

Détermination de l'humidité par la méthode des deux thermomètres.

La formule utilisée par le concepteur de l'installation est la suivante :

$$p_v(t_s) = p_{vsat}(t_w) - 6.666.10^{-4} \cdot p \cdot (t_s - t_w) \quad \text{ou} \quad \phi_v = \frac{p_{vs}(t_w)}{p_s} - 6.666.10^{-4} (t_s - t_w)$$

p_v : Pression partielle de la vapeur d'eau à la température de l'écoulement t_s °C

p_{vsat} : Pression de vapeur saturante à la température de l'écoulement

p : Pression totale mesurée

t_w : Température au thermomètre mouillé °C

ϕ_v : Fraction molaire de la vapeur d'eau

On introduit également :

x : Humidité absolue $x = \frac{\text{masse de vapeur d'eau}}{\text{masse d'air}} = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\phi_v}{1 - \phi_v} \frac{M_e}{M_a}$

ψ : Humidité relative (degré hygrométrique) $\psi = \frac{p_v}{p_{vs}}$

0. Questions préliminaires :

Comparer la formule pratique à la formule théorique (à justifier) obtenue en TD.

$$x_s = \frac{Cp_a(t_w - t_s) + x_2(L_0 + Cp_v t_w - C_L t_s)}{L_0 + Cp_v t_s - C_L t_s}$$

Monter que si on néglige : l'enthalpie de l'eau liquide et $Cp_a t$ devant L_0 alors on obtient une relation de la forme : $p_v = p_{vsat}(t_w) - \alpha \cdot p \cdot (t_s - t_w)$.

Comparer la valeur de α à la valeur utilisée dans la formule pratique.

Montrer également que les hypothèses faites conduisent à une évolution à enthalpie constante pour l'air humide.

Vérification :

Comparer numériquement et sur le diagramme de l'air humide les diverses expressions pour $t_s = 25^\circ\text{C}$ et $t_w = 19.5^\circ\text{C}$. Calculer le degré hygrométrique ψ .

Modèles :

Pour l'air : le modèle gaz parfait $h_a = Cp_a t$

Pour l'eau à l'état liquide : $h_{eau} = C_L t$ avec $C_L = 4,185 \text{ kJ/kg/K}$

Pour la vapeur d'eau : le modèle gaz parfait $h_v = L_0 + Cp_v t$

$$\text{Pression de vapeur saturante : } \begin{cases} p_{vsat}(T) = p_{vsat}(20) \cdot \text{Exp} \left[-\frac{L_{lv}(20)}{r_c} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293} \right) \right] \\ p_{vsat}(20) = 0,02337 \text{ bar et } L_{lv}(20) = 2454 \text{ kJ/kg} \end{cases}$$

Pour l'enthalpie de l'air humide : $h(x) = \frac{H}{m_a} = h_a + x h_v$

Précisions importantes :

- 1) *Toujours remplir d'eau distillée le réservoir de compensation avant que le niveau d'eau ne chute au-dessous de 5 cm.*
- 2) *S'assurer que les deux mini réservoirs des capteurs de température mouillée soient bien remplis d'eau distillée. Prévenir l'encadrant au besoin.*
- 3) *La température de l'eau de compensation est supposée être la même que la température ambiante (entrée d'air en bas de colonne t_1).*
- 4) *Lors des changements des conditions d'expériences (chauffage, débit d'air,...) pour obtenir un régime permanent il est nécessaire d'attendre plusieurs minute.*

Le rendement de la colonne de refroidissement dépend de plusieurs facteurs : Le débit d'air, le débit d'eau, la température de l'eau (puissance de chauffage), de la température et de l'humidité de l'air à l'entrée. Il dépend également des dimensions de la colonne ainsi que la nature du garnissage et de sa surface d'échange.

Dans les expériences proposées on s'intéressera principalement à l'influence du chauffage et à l'influence des débits d'eau et d'air sur l'efficacité de la colonne.

I. Expériences préliminaires.

Sans chauffage démarrer et stabiliser la colonne sous les conditions suivantes : différentiel de l'orifice $\Delta h = 15 \text{ mm H}_2\text{O}$ et un débit d'eau **40 g/s**.

(Remarque : la stabilité est atteinte lorsqu'il n'y a plus de variation notable de la température ou du débit).

Observer et relever toutes températures en entrée et en sortie dans la colonne et dans l'écoulement d'eau. Comment évolue la température de l'eau T_5 et pourquoi ? Relever la pression en haut et en bas de colonne. Conserver ces mesures, elles vous seront utiles par la suite comme cas de référence sans chauffage.

II. Bilan de masse et d'énergie.

Démarrer et stabiliser la colonne de refroidissement sous les conditions suivantes :

- différentiel de l'orifice $\Delta h = 15 \text{ mm H}_2\text{O}$
- Débit d'eau **40 g/s**
- Charge de refroidissement (puissance de chauffage) **0,5 kW**

On pourra estimer le temps réel de stabilisation en relevant chaque minute la température (par exemple T_5) pendant 10 et 15 min et tracer la courbe de T_5 en fonction du temps.

Quand la colonne est stable, remplir le réservoir de compensation jusqu'au trait de remplissage et déclencher le chronomètre. Relever les températures et les autres paramètres. Au terme de cette période d'étude d'environ 10 minutes, noter le temps écoulé au chronomètre et remplir à nouveau avec une éprouvette graduée le réservoir de compensation jusqu'au trait de remplissage. En déduire le débit masse d'eau évacuée : \dot{m}_e

II. 1. Bilan de masse :

Déterminer :

- le débit d'air
- l'humidité absolue en entrée et en sortie de la colonne déduire le débit masse de vapeur d'eau évacuée \dot{m}_v .

Comparer cette valeur à \dot{m}_e . Commentaires.

II. 2. Bilan d'énergie :

Déterminer par calcul ou avec le diagramme de l'air humide :

- l'enthalpie de l'air humide en entrée et en sortie de la colonne

- l'enthalpie de l'eau à l'état liquide entre 5 et 6
- l'enthalpie de l'eau de compensation (7)

Remarque : dans cette étude on pourra soit lire les valeurs de l'enthalpie sur le diagramme de l'air humide soit utiliser les modèles.

Faire un bilan d'énergie dans la tour en excluant la cuve de chauffage et vérifier l'équilibre de ce bilan.

On définit l'efficacité de l'échangeur par :

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{liq}}}{(\dot{Q}_{\text{liq}})_{\text{max}}} \quad \dot{Q}_{\text{liq}} \text{ Puissance thermique de refroidissement de l'eau liquide}$$

et $(\dot{Q}_{\text{liq}})_{\text{max}}$ Puissance thermique maximale possible.

Montrer que $\epsilon = \frac{T_5 - T_6}{T_5 - T_1}$ et déterminer ce coefficient.

Faire également un bilan d'énergie dans le circuit d'eau (entre 5, 6 et 7) et en déduire la puissance de chauffage.

Comparer à la puissance de chauffage choisie.

Remplir les tableaux récapitulatifs de vos mesures, de vos calculs et de vos résultats. Commentaires.

III. Influence de la charge de refroidissement :

Pour les mêmes débits d'air et d'eau (**40g/s**), faire varier la charge de refroidissement de 0 à 1,5 kW. Après stabilisation relever les températures. Relever toutes les mesures (feuille de lecture), bien que toutes ne soient pas utiles. Ne pas refaire le bilan de masse d'eau évaporée.

Tracer l'efficacité de la tour de refroidissement en fonction de la puissance de chauffage. Commentaires.

IV. Influence du débit d'air :

Pour les mêmes débits d'eau (**40 g/s**) et pour une charge de refroidissement 1,5 kW, faire varier le débit d'air en agissant sur le dispositif en entrée du ventilateur. Après stabilisation relever les températures. Relever toutes les mesures, bien que toutes ne soient pas utiles. Ne pas refaire le bilan de masse d'eau évaporée.

Tracer l'efficacité de la tour de refroidissement en fonction de la vitesse de l'air (section de la colonne 0,15 x 0,15 m²).

Tracer la quantité d'eau évaporée en fonction de la vitesse de l'air.

Tracer le coefficient de pertes de charge dans la colonne définit par : $K_c = \frac{2 \cdot \Delta P_{\text{pdc}}}{\rho_a V_a^2}$

en fonction du Reynolds $Re = \frac{V_a D}{\nu_a}$ avec $D=0,15$ m et $\nu_a = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s.

Commentaires.

V. Influence du débit d'eau :

Pour une charge de refroidissement choisie et un débit d'air choisi faire varier le débit d'eau.

Tracer l'efficacité de la tour de refroidissement en fonction du débit d'eau.

Tracer la quantité d'eau évaporée en fonction du débit d'eau.

Date :

Groupe et Noms :

Feuille d'expérience : Expériences préliminaires

Référence de l'expérience		1	2	3	4
Thermomètre sec (entrée d'air)	T_1 (°C)				
Thermomètre mouillé (entrée d'air)	T_{2w} (°C)				
Thermomètre sec (sortie d'air)	T_3 (°C)				
Thermomètre mouillé (sortie d'air)	T_{4w} (°C)				
Température de l'eau en entrée	T_5 (°C)				
Température de l'eau en sortie	T_6 (°C)				
Température de l'eau d'appoint	T_7 (°C)				
Différentiel de l'orifice (pression relative en sortie de colonne)	Δh_s (mmH ₂ O)	15	15	15	15
Pression relative à l'entrée de colonne	Δh_e (mmH ₂ O)				
Débit d'eau	\dot{m}_e (g/s)	40	40	40	40
Volume d'eau introduite durant l'expérience (compensation)	Δm_e (kg)				
Intervalle de temps de l'expérience	θ (s)				
Perte de charge (chute de pression dans la colonne)	Δp (mmH ₂ O)				
Charge de refroidissement	\dot{Q} (kW)	0	0	0	0

Bilan de masse et d'énergie.

T_5 (°C)	t (s)	T_5 (°C)	t (s)	T_5 (°C)	t (s)
	30		210		480
	60		240		540
	90		270		600
	120		300		660
	150		360		720
	180		420		780

Tracer T_5 en fonction du temps.

Date :

Groupe et Noms :

Feuille d'expérience : Bilan de masse et d'énergie

Référence de l'expérience		1	2	3	4
Thermomètre sec (entrée d'air)	T_1 (°C)				
Thermomètre mouillé (entrée d'air)	T_{2w} (°C)				
Thermomètre sec (sortie d'air)	T_3 (°C)				
Thermomètre mouillé (sortie d'air)	T_{4w} (°C)				
Température de l'eau en entrée	T_5 (°C)				
Température de l'eau en sortie	T_6 (°C)				
Température de l'eau d'appoint	T_7 (°C)				
Différentiel de l'orifice (pression relative en sortie de colonne)	Δh_s (mmH ₂ O)				
Pression relative à l'entrée de colonne	Δh_e (mmH ₂ O)				
Débit d'eau	\dot{m}_e (g/s)				
Volume d'eau introduite durant l'expérience (compensation)	Δm_e (kg)				
Intervalle de temps de l'expérience	θ (s)	600			
Perte de charge (chute de pression dans la colonne)	Δp (mmH ₂ O)				
Charge de refroidissement	\dot{Q} (kW)	0,5	0,5	0,5	0,5

FEUILLE DE CALCUL :

AIR HUMIDE		entrée	sortie
t	°C		
tw	°C		
ϕ_v (fraction molaire)			
ha (enthalpie de l'air)	kJ/kg		
hv (enthalpie de la vapeur)	kJ/kg		
x (humidité absolue)			
h (enthalpie de l'air humide)	kJ/kg		
h (enthalpie de l'air humide) diagramme	kJ/kg		
ψ (humidité relative)			
p_{vsat} (pression de vapeur saturante)	bar		
m_a (débit masse d'air)	kg/s		
m_v (débits masses de vapeur)	g/s		
Δm_v (masse de vapeur évacuée)	g/s		
v_a (volume massique d'air)	m ³ /kg		
v_v (volumes massiques de vapeur)	m ³ /kg		
V (volumes massiques de vapeur humide)	m ³ /kg		
p - p_{atm} (pression relative)	Pa		
p (pression absolue)	Pa		
V̇_a (débit volumique air)	m ³ /s		
U_a = V̇_a / S (Vitesse air)	m/s		
Δp_{pd} (perte de charge)	Pa		

EAU LIQUIDE		Entrée (5)	Sortie (6)	Compensation (7)
t	°C			
h_{eau} (enthalpie de l'eau)	kJ/kg			
m_{eau} (débit masse)	g/s			
Δm_{eau} (apport d'eau)	g/s			

Bilan d'énergie dans la tour		
Variation d'enthalpie de l'air	kW	
Variation d'enthalpie de vapeur d'eau	kW	
Variation d'enthalpie de vapeur humide	kW	
Variation d'enthalpie de l'eau liquide	kW	
Equilibre du bilan	kW	

Bilan d'énergie dans le circuit d'eau		
Enthalpie d'entrée	kW	
Apport d'enthalpie de compensation	kW	
Enthalpie de sortie	kW	
Variation d'enthalpie	kW	
Apport d'énergie	kW	
Equilibre du bilan	kW	

Date :

Groupe et Noms :

Feuille d'expérience : Influence de la charge de refroidissement

Référence de l'expérience		1	2	3	4
Thermomètre sec (entrée d'air)	T_1 (°C)				
Thermomètre mouillé (entrée d'air)	T_{2w} (°C)				
Thermomètre sec (sortie d'air)	T_3 (°C)				
Thermomètre mouillé (sortie d'air)	T_{4w} (°C)				
Température de l'eau en entrée	T_5 (°C)				
Température de l'eau en sortie	T_6 (°C)				
Température de l'eau d'appoint	T_7 (°C)				
Différentiel de l'orifice (pression relative en sortie de colonne)	Δh_s (mmH ₂ O)				
Pression relative à l'entrée de colonne	Δh_e (mmH ₂ O)				
Débit d'eau	\dot{m}_e (g/s)	40	40	40	40
Volume d'eau introduite durant l'expérience (compensation)	Δm_e (kg)				
Intervalle de temps de l'expérience	θ (s)				
Perte de charge (chute de pression dans la colonne)	Δp (mmH ₂ O)				
Charge de refroidissement	\dot{Q} (kW)	0	0,5	1	1,5

Date :

Groupe et Noms :

Feuille d'expérience : Influence du débit d'air

Référence de l'expérience		1	2	3	4
Thermomètre sec (entrée d'air)	T_1 (°C)				
Thermomètre mouillé (entrée d'air)	T_{2w} (°C)				
Thermomètre sec (sortie d'air)	T_3 (°C)				
Thermomètre mouillé (sortie d'air)	T_{4w} (°C)				
Température de l'eau en entrée	T_5 (°C)				
Température de l'eau en sortie	T_6 (°C)				
Température de l'eau d'appoint	T_7 (°C)				
Différentiel de l'orifice (pression relative en sortie de colonne)	Δh_s (mmH ₂ O)				
Pression relative à l'entrée de colonne	Δh_e (mmH ₂ O)				
Débit d'eau	\dot{m}_e (g/s)	40	40	40	40
Volume d'eau introduite durant l'expérience (compensation)	Δm_e (kg)				
Intervalle de temps de l'expérience	θ (s)	300	600	900	1200
Perte de charge (chute de pression dans la colonne)	Δp (mmH ₂ O)				
Charge de refroidissement	\dot{Q} (kW)	1,5	1,5	1,5	1,5

Date :

Groupe et Noms :

Feuille d'expérience : Influence du débit d'eau

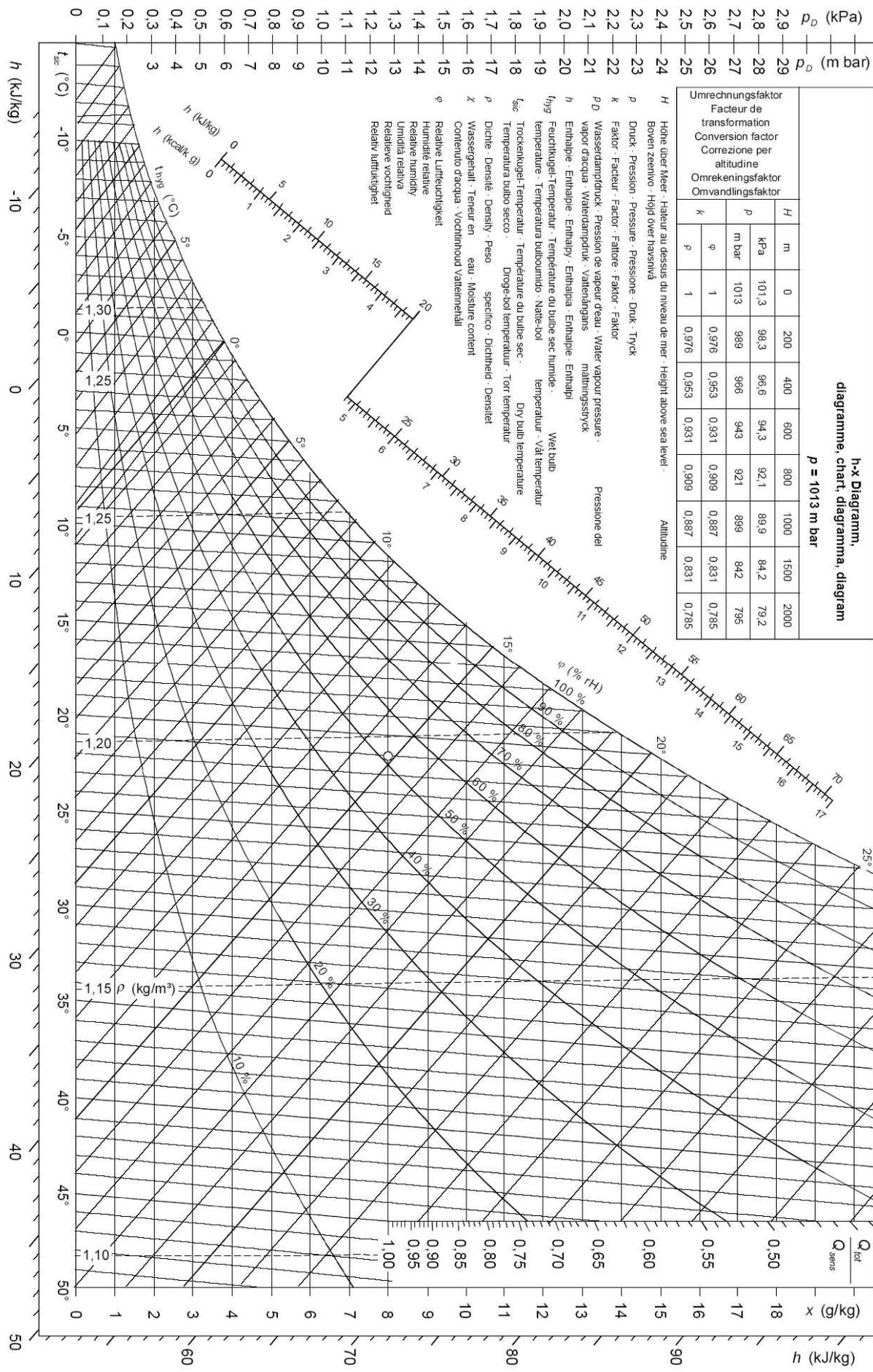
Référence de l'expérience		1	2	3	4
Thermomètre sec (entrée d'air)	T_1 (°C)				
Thermomètre mouillé (entrée d'air)	T_{2w} (°C)				
Thermomètre sec (sortie d'air)	T_3 (°C)				
Thermomètre mouillé (sortie d'air)	T_{4w} (°C)				
Température de l'eau en entrée	T_5 (°C)				
Température de l'eau en sortie	T_6 (°C)				
Température de l'eau d'appoint	T_7 (°C)				
Différentiel de l'orifice (pression relative en sortie de colonne)	Δh_s (mmH ₂ O)				
Pression relative à l'entrée de colonne	Δh_e (mmH ₂ O)				
Débit d'eau	\dot{m}_e (g/s)				
Volume d'eau introduite durant l'expérience (compensation)	Δm_e (kg)				
Intervalle de temps de l'expérience	θ (s)	300	600	900	1200
Perte de charge (chute de pression dans la colonne)	Δp (mmH ₂ O)				
Charge de refroidissement	\dot{Q} (kW)	1,5	1,5	1,5	1,5

Extrait des tables de la vapeur d'eau**(équilibre entre phases)**

t (°C)	pvs (bar)	v m3/kg	hv (kJ/kg)
10.0	0.01227	106.40	2519.9
13.0	0.01500	87.98	2525.5
15.0	0.01704	77.98	2529.1
17.5	0.02000	67.01	2533.6
20.0	0.02337	57.84	2538.2
21.1	0.02500	54.26	2540.2
24.1	0.03000	45.67	2545.6
25.0	0.03166	43.40	2547.3
29.0	0.04000	34.80	2554.5
30.0	0.04241	32.93	2556.4
32.9	0.05000	28.19	2561.6
35.0	0.05622	25.24	2565.4
36.2	0.06000	23.74	2567.5
40.0	0.07375	19.55	2574.4

**h-x Diagramm,
diagramme, chart, diagramma, diagram**
 $p = 1013 \text{ m bar}$

Umrechnungsfaktor Facteur de transformation Conversion factor Correzione per altitudine Omrækningsfaktor Omvandlingsfaktor		H	0	200	400	600	800	1000	1500	2000
k	p	m	101,3	98,3	96,6	94,3	92,1	89,9	84,2	79,2
	φ	m bar	101,3	98,9	96,6	94,3	92,1	89,9	84,2	79,5
k	p	φ	1	0,976	0,953	0,931	0,909	0,887	0,831	0,785
	p	φ	1	0,976	0,953	0,931	0,909	0,887	0,831	0,785



H Höhe über Meer · Hauteur au dessus du niveau de mer · Height above sea level · Altitudine
 Boven zeevlak · Høj over havniveau

p Druck · Pression · Pressure · Pressione · Druk · Tryk
 Faktor · Facteur · Factor · Fattore · Faktor · Faktor

pD Wasserdampfdruck · Pression de vapeur d'eau · Water vapour pressure ·
 vapor d'acqua · Waterdampdruk · Våterångans · matångstryck

h Enthale · Enthale · Enthaly · Enthale · Enthale
 Feuchtkugel-Temperatur · Température du bulbe sec humide ·
 temperature · Temperatura bulbo umido · Næte-bol ·
 temperature · Wet bulb

t_{sc} Trockenkugel-Temperatur · Température du bulbe sec ·
 Temperatur bulbo secco · Droge-bol temperatur · Våt temperatur
 Dry bulb temperature

p Dichte · Densité · Density · Densità · Densitet

z Wassergehalt · Teneur en eau · Moisture content

φ Contento d'acqua · Vochoinhouid · Våtermetall

φ Humidité relative

φ Umidade relativa

φ Relative humidity

φ Relativ luftfugtighed

φ Relativ luftfugtighed