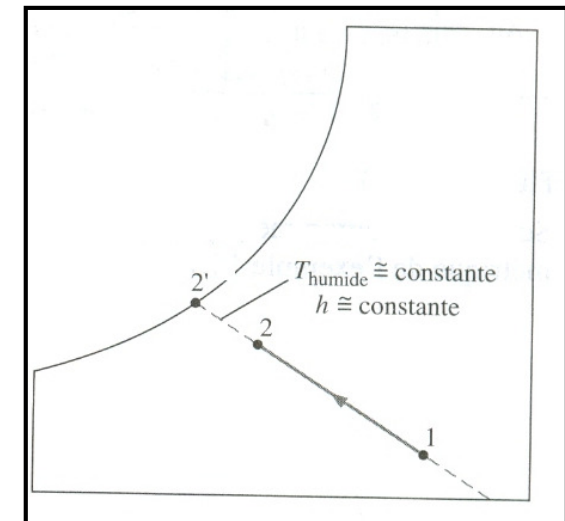
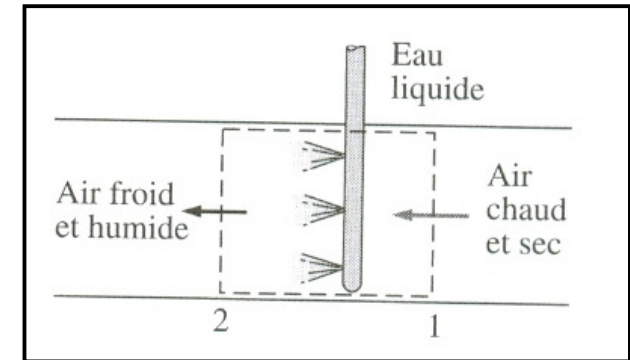


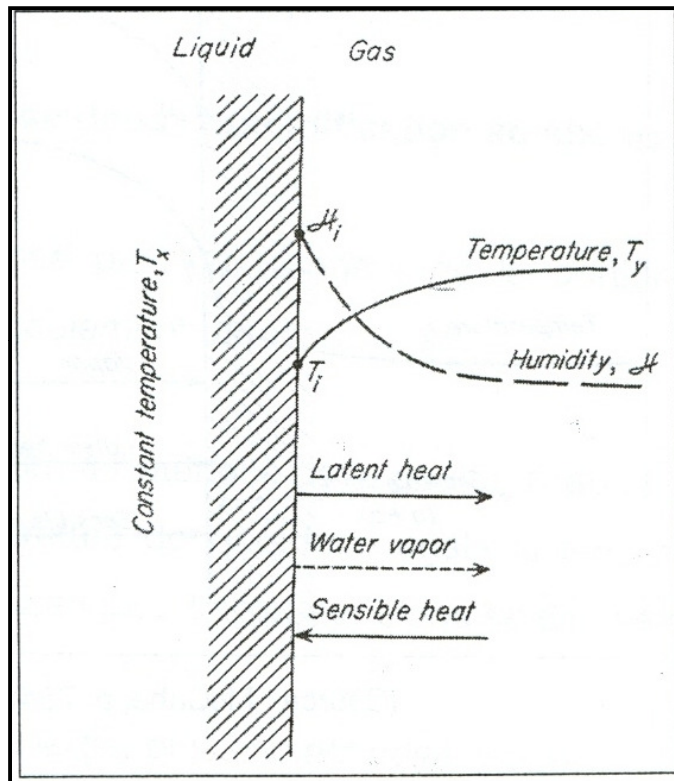
Humidification adiabatique

- Consiste à pulvériser finement l'eau (à l'aide d'air comprimé) dans l'air sans apport d'énergie thermique
- L'objectif: refroidir ou humidifier l'air
- L'eau pulvérisée s'évapore en contact avec l'air non saturé
- Pas d'apport de chaleur.
- Diminution de la température de l'air et augmentation de H_R
- L'enthalpie totale de l'air humide reste la même
(h perdue par l'air = gagnée par l'eau)
- h constante = **humidification isenthalpique = adiabatique**
- Dans le cas limite, l'air humidifié devient saturé
- Diagramme psychrométrique – droites de h constante



Mécanisme d'interaction liquide-gaz

Humidification adiabatique (cas le plus simple)

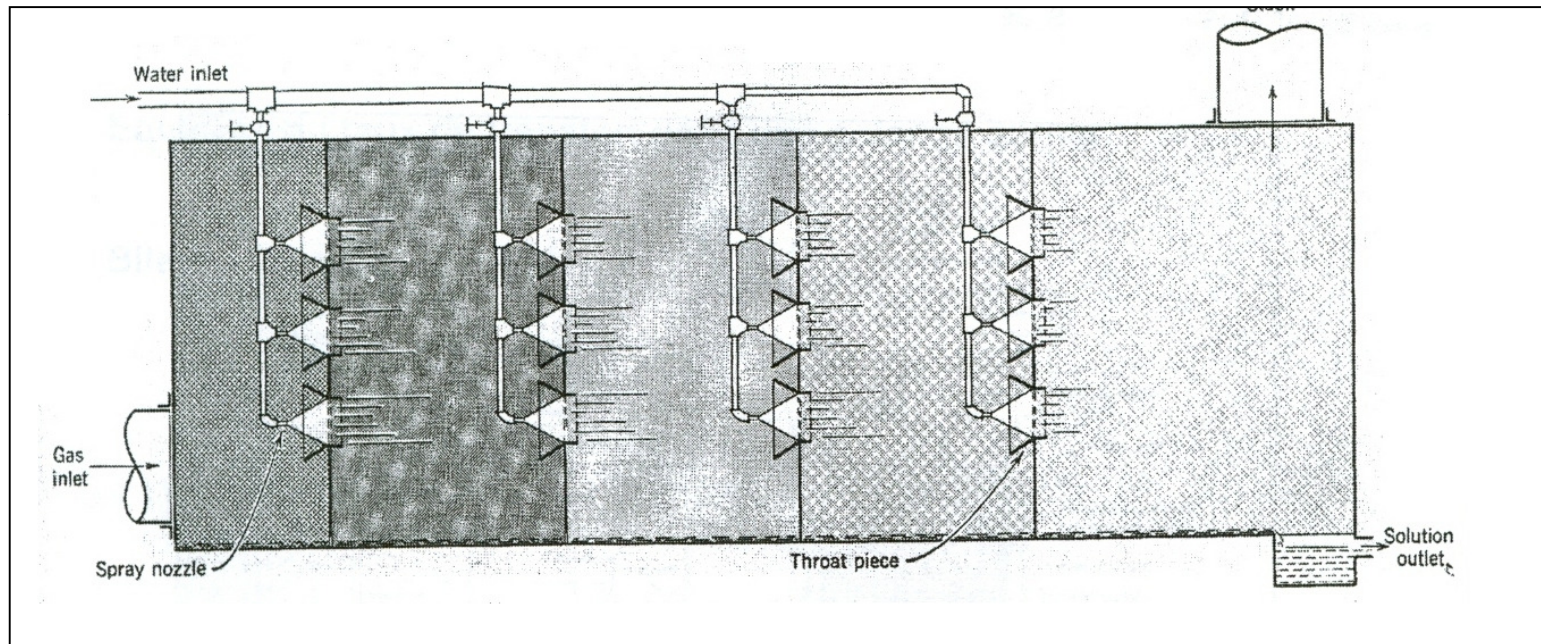


- ✓ Mécanisme qui suit les droites de refroidissement adiabatique (diagramme P.)
- ✓ Ordonnée $-T$, h et H ; Abscisse – distance perpendiculaire à l'interface
- ✓ L'eau (plus froide que le gaz) est atomisée dans un gaz chaud insaturé
- ✓ Transfert de l'eau vers l'air
- ✓ L'humidité augmente et se rapproche de l'humidité de saturation
- ✓ La $T_{\text{eau}} = \text{constante}$
- ✓ Énergie libérée par l'eau et énergie captée par l'air sont $=0$
- ✓ La chaleur sensible air = la chaleur latente air

Humidification adiabatique

Chambre à jets

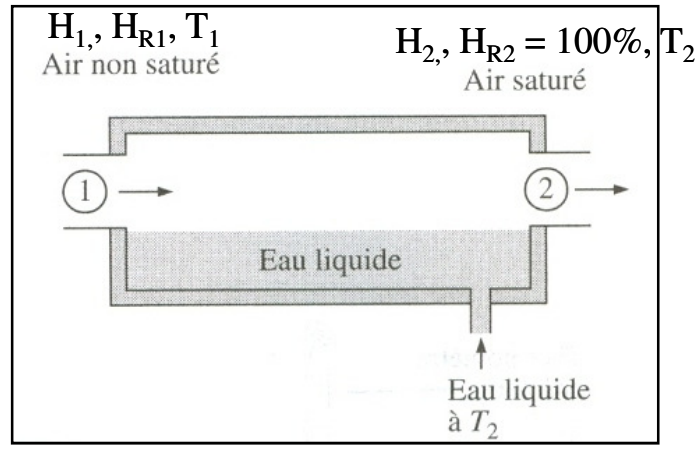
- ❖ Humidification adiabatique industrielle
- ❖ Gaz chaud non saturé + liquide froid atomisé
- ❖ Température de l'eau reste constante
- ❖ Le gaz peut être refroidi ou humidifié sans nécessairement atteindre la saturation



Humidification adiabatique

Saturation adiabatique

- ❖ Obtenue si écoulement en régime permanent d'air humide
- ❖ T_1 est connue, $H_1 =$ inconnue
- ❖ Conduite adiabatique dans lequel se trouve un réservoir d'eau liquide
- ❖ H_2O s'évapore et se mélange à l'air
- ❖ L'humidité dans l'air croît durant l'évolution et sa température diminue (une partie de la chaleur latente d'évaporation de l'eau provient de l'air)
- ❖ Si le conduit est suffisamment long, l'air devient saturé à la T_2
- ❖ $T_2 =$ température de saturation adiabatique
- ❖ H_2O d'appoint (à T_2) est ajoutée dans le conduit pour compenser le taux d'évaporation



Bilan massique

Air sec	$\dot{m}_{AS1} = \dot{m}_{AS2} = \dot{m}_{AS}$
L'eau	$\dot{m}_{V1} + \dot{m}_{ev} = \dot{m}_{V2}$

\dot{m}_{AS} = débit massique d'air sec (kgAS/h)
 \dot{m}_{V1} = débit massique de vapeur à l'état 1 (kgvapeur/h)
 \dot{m}_{ev} = débit massique de l'eau qui s'évapore (kgH₂O/h)

Humidification adiabatique

La masse de la vapeur peut être exprimée en fonction de l'humidité absolue:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{AS} H \quad (1.16)$$

On introduit (1.16) dans l'équation de bilan massique de l'eau et on obtient:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{AS} \cdot H_1 + \dot{m}_{ev} &= \dot{m}_{AS} H_2 \\ \dot{m}_{ev} &= \dot{m}_{AS} (H_2 - H_1) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Bilan énergétique

$$\begin{aligned} E_{entrée} &= E_{sortie} \\ \dot{m}_{AS} \cdot h_1 + \dot{m}_{ev} \cdot h_{ev} &= \dot{m}_{AS} h_2 \end{aligned} \quad (1.18)$$

La substitution de 1.17 en 1.18, conduit à:

$$\dot{m}_{AS} \cdot h_1 + \dot{m}_{AS} \cdot (H_2 - H_1) \cdot h_{ev} = \dot{m}_{AS} h_2 \quad (1.19)$$

Simplification par le débit d'air sec

$$h_1 + (H_2 - H_1) \cdot h_{ev} = h_2 \quad (1.20)$$

Humidification adiabatique

On exprime h_1 et h_2 à l'aide de l'expression:

$$(C_p T_1 + H_1 h_v) + (H_2 - H_1) \cdot h_{ev} = (C_p T_2 + H_2 h_v)$$

H_2 est l'humidité à la saturation, donc elle peut être exprimée à l'aide de la relation

(1.8) –cours1:

$$H_2 = H_s = 0,622 \frac{P_s}{P_2 - P_s} \quad (1.22)$$

Le calcul de H_2 permettra de calculer par la suite H_1 , à l'aide de la relation:

$$H_1 = \frac{C_p (T_2 - T_1) + H_2 h_{ev}}{h_v - h_{ev}} \quad (1.21)$$

La chaleur latente de vaporisation de l'eau (h_{ev}) est donnée par l'équation :

$$h_{ev} = 2495,280 + 2,346T \quad (1.23)$$

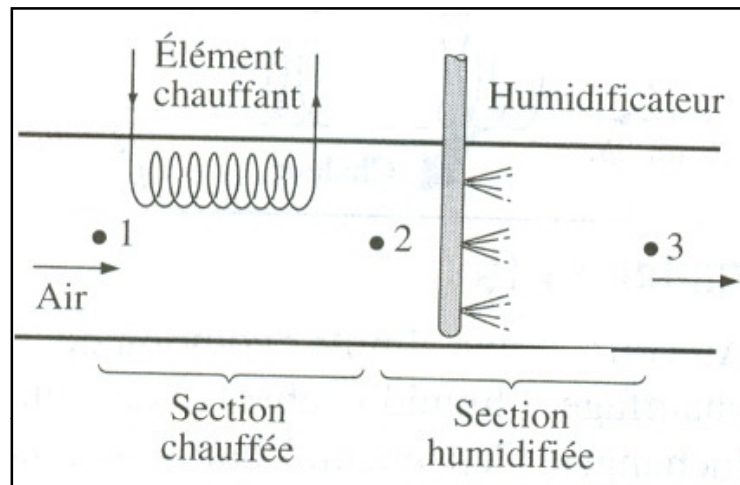
Humidification adiabatique

Table 1.3 Variables de la vapeur d'eau saturée

Température $T, ^\circ\text{C}$	Pression de saturation $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$	Volume massique m^3/kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg		
		Liquide saturé v_f	Vapeur saturée v_g	Liquide saturé u_f	Évapo- ration u_{fg}	Vapeur saturée u_g	Liquide saturé h_f	Évapo- ration h_{fg}	Vapeur saturée h_g
0,01	0,6117	0,001000	206,00	0,000	2 374,9	2 374,9	0,001	2 500,9	2 500,9
5	0,8725	0,001000	147,03	21,019	2 360,8	2 381,8	21,020	2 489,1	2 510,1
10	1,2281	0,001000	106,32	42,020	2 346,6	2 388,7	42,022	2 477,2	2 519,2
15	1,7057	0,001001	77,885	62,980	2 332,5	2 395,5	62,982	2 465,4	2 528,3
20	2,3392	0,001002	57,762	83,913	2 318,4	2 402,3	83,915	2 453,5	2 537,4
25	3,1698	0,001003	43,340	104,83	2 304,3	2 409,1	104,83	2 441,7	2 546,5
30	4,2469	0,001004	32,879	125,73	2 290,2	2 415,9	125,74	2 429,8	2 555,6
35	5,6291	0,001006	25,205	146,63	2 276,0	2 422,7	146,64	2 417,9	2 564,6
40	7,3851	0,001008	19,515	167,53	2 261,9	2 429,4	167,53	2 406,0	2 573,5
45	9,5953	0,001010	15,251	188,43	2 247,7	2 436,1	188,44	2 394,0	2 582,4
50	12,352	0,001012	12,026	209,33	2 233,4	2 442,7	209,34	2 382,0	2 591,3
55	15,763	0,001015	9,5639	230,24	2 219,1	2 449,3	230,26	2 369,8	2 600,1
60	19,947	0,001017	7,6670	251,16	2 204,7	2 455,9	251,18	2 357,7	2 608,8
65	25,043	0,001020	6,1935	272,09	2 190,3	2 462,4	272,12	2 345,4	2 617,5
70	31,202	0,001023	5,0396	293,04	2 175,8	2 468,9	293,07	2 333,0	2 626,1
75	38,597	0,001026	4,1291	313,99	2 161,3	2 475,3	314,03	2 320,6	2 634,6
80	47,416	0,001029	3,4053	334,97	2 146,6	2 481,6	335,02	2 308,0	2 643,0
85	57,868	0,001032	2,8261	355,96	2 131,9	2 487,8	356,02	2 295,3	2 651,4
90	70,183	0,001036	2,3593	376,97	2 117,0	2 494,0	377,04	2 282,5	2 659,6
95	84,609	0,001040	1,9808	398,00	2 102,0	2 500,1	398,09	2 269,6	2 667,6
100	101,42	0,001043	1,6720	419,06	2 087,0	2 506,0	419,17	2 256,4	2 675,6
105	120,90	0,001047	1,4186	440,15	2 071,8	2 511,9	440,28	2 243,1	2 683,4
110	143,38	0,001052	1,2094	461,27	2 056,4	2 517,7	461,42	2 229,7	2 691,1
115	169,18	0,001056	1,0360	482,42	2 040,9	2 523,3	482,59	2 216,0	2 698,6
120	198,67	0,001060	0,89133	503,60	2 025,3	2 528,9	503,81	2 202,1	2 706,0
125	232,23	0,001065	0,77012	524,83	2 009,5	2 534,3	525,07	2 188,1	2 713,1

Humidification adiabatique

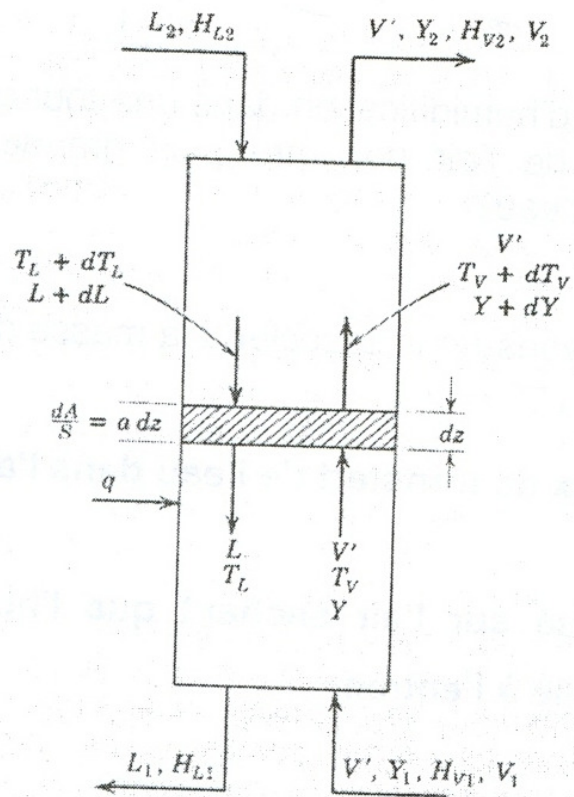
Chauffage avec humidification



- Évolution 1-2 = séchage = humidité constante ($H_1 = H_2$)
- Évolution 2-3 = humidification = humidité augmente $H_3 > H_2$
- $T_3 < T_2$ (l'air cède une partie de chaleur pour vaporiser l'eau)

Colonne garnie

Schéma de l'opération dans une tour garnie



- ✓ Transfert de masse par « brassage » de la portion turbulente
- ✓ Diffusion moléculaire à l'interface de la goutte d'eau et de la bulle d'air
- ✓ La vapeur d'eau se diffuse dans la bulle d'air
- ✓ Plus la colonne est large, plus est elle adiabatique
- ✓ Application en environnement (CO₂ solution)



Colonne garnie

$$\text{masse(AH)}_{\text{sortie}} - \text{masse(AH)}_{\text{entrée}} = ?$$

$$\text{masse(AS)}_{\text{sortie}} = \text{masse(AS)}_{\text{entrée}}$$

$$\text{masse(eau)}_{\text{sortie}} \neq \text{masse(eau)}_{\text{entrée}}$$

Taux de transfert = débit massique/h

$$H_{\text{sortie}} = \frac{m_{V\text{sortie}}}{m_{AS}} \quad H_{\text{entrée}} = \frac{m_{V\text{entrée}}}{m_{AS}} \quad (1.24)$$

$$m_{V\text{sortie}} = m_{AS} \cdot H_{\text{sortie}} \quad m_{V\text{entrée}} = m_{AS} \cdot H_{\text{entrée}} \quad (1.25)$$

b. Débit massique d'eau transféré à l'air

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{AS} (H_{\text{sortie}} - H_{\text{entr}}) \quad (1.26)$$



Colonne garnie

Équation du taux de transfert dans une colonne garnie

$$Na_{air} = K_g a (P_i - P_g) SZ$$

Na_{air} = taux de transfert de l'eau dans l'air (moles / h)

K_g = coefficient de transfert (constant le long de la colonne) (moles / h · m² · kPa)

a = surface de contact par unité de volume (m² / m³) – difficile à évaluer

P_i = pression partielle de l'eau à l'interface (kPa) – pression de vapeur saturée à $T_{moyenne}$ (tables)

P_g = pression partielle de l'eau dans l'air (kPa)

S = section transversale de la colonne (m²)

Z = hauteur de garnissage (m)

Similaire à une équation de transfert de chaleur laquelle contient un coefficient de transfert

Humidification dans une colonne garnie à contre-courant

Coefficient de transfert dépend de:

1. Des propriétés physico-chimiques des 2 composants en présence
2. Caractéristiques de l'équipement utilisé
3. Conditions de l'écoulement
4. Doit être positif – la différence de pressions partielles doit être écrite pour être +

Problèmes:

1. Le coefficient de transfert de matière doit être évalué
2. La surface normale au transfert n'est pas toujours connue
3. Le taux de transfert de matière n'est pas constant le long de l'appareil (différence de pression variable) – il faudrait intégrer l'équation pour évaluer la performance de l'équipement entier)
4. La valeur de la pression partielle du composant transféré à l'interface est difficile à évaluer – on suppose qu'il n'y a pas de résistance au transfert et que la phase gazeuse est en équilibre avec la phase liquide à l'interface –
$$P(\text{interface du liquide}) = p(\text{vapeur à } T_{\text{liquide}})$$