Université de Djilali Bounaama
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie de procédés
Opérations unitaires fluide-solide
M1 GPH/M1 GA

Année universitaire : 2025- 2026

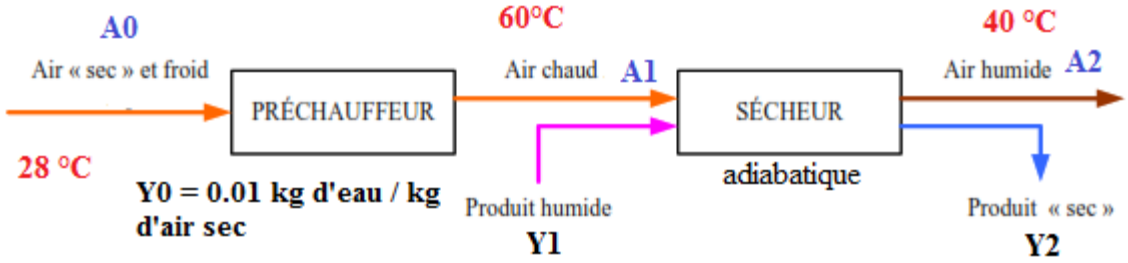
Corrigé série d'exercices : Séchage

Exercice 01 :

Un air A_0 présente les caractéristiques suivantes : T_0 = 28 °C, Y_0= 0,01 kg d'eau / kg d'air sec.

L'air est chauffé (A1) et atteint la température T_1 = 60 °C. Il sert à réaliser un séchage adiabatique et sort à une température T_2 = 40 °C (air 2 : A2).

- Déterminer Y_1 et Y_2 ?



Graphiquement :

Y_0= 0,01 kg d'eau / kg d'air sec = 10 g d'eau/ kg d'air sec

L'air n'est pas chargé d'eau dans le préchauffeur => $Y_0 = Y_1$ = 10 g d'eau/ kg d'air sec

L'enthalpie correspondante H = 86 kJ/kg d'air sec

Dans le sécheur, un séchage adiabatique est assuré => H = constante, et T_2 = 40 °C => Y_2 = 17.9 g d'eau/ kg d'air sec. (Voir le diagramme d'air humide ci-dessous)

- Déterminer le débit d'air sec, si on souhaite évaporer 1000 kg d'eau/h ?

Le liquide éliminé de la phase solide et capté par la phase gaz lors du séchage.

V (débit d'eau éliminé par le sécheur et capté par l'air) = Ma ($Y_2 - Y_1$) = 1000 kg d'eau vapeur.

Avec, Ma : débit d'air sec

Y_1, Y_2 : humidité absolue à l'entrée et à la sortie du sécheur.

$$Ma = \frac{V}{Y_2 - Y_1} = \frac{1000}{(17.9 - 10)10^{-3}} \left(\frac{\frac{kg}{h}}{\frac{kg}{kg}}\right)$$

=> Ma = 126582.27 kg/h

Autrement :

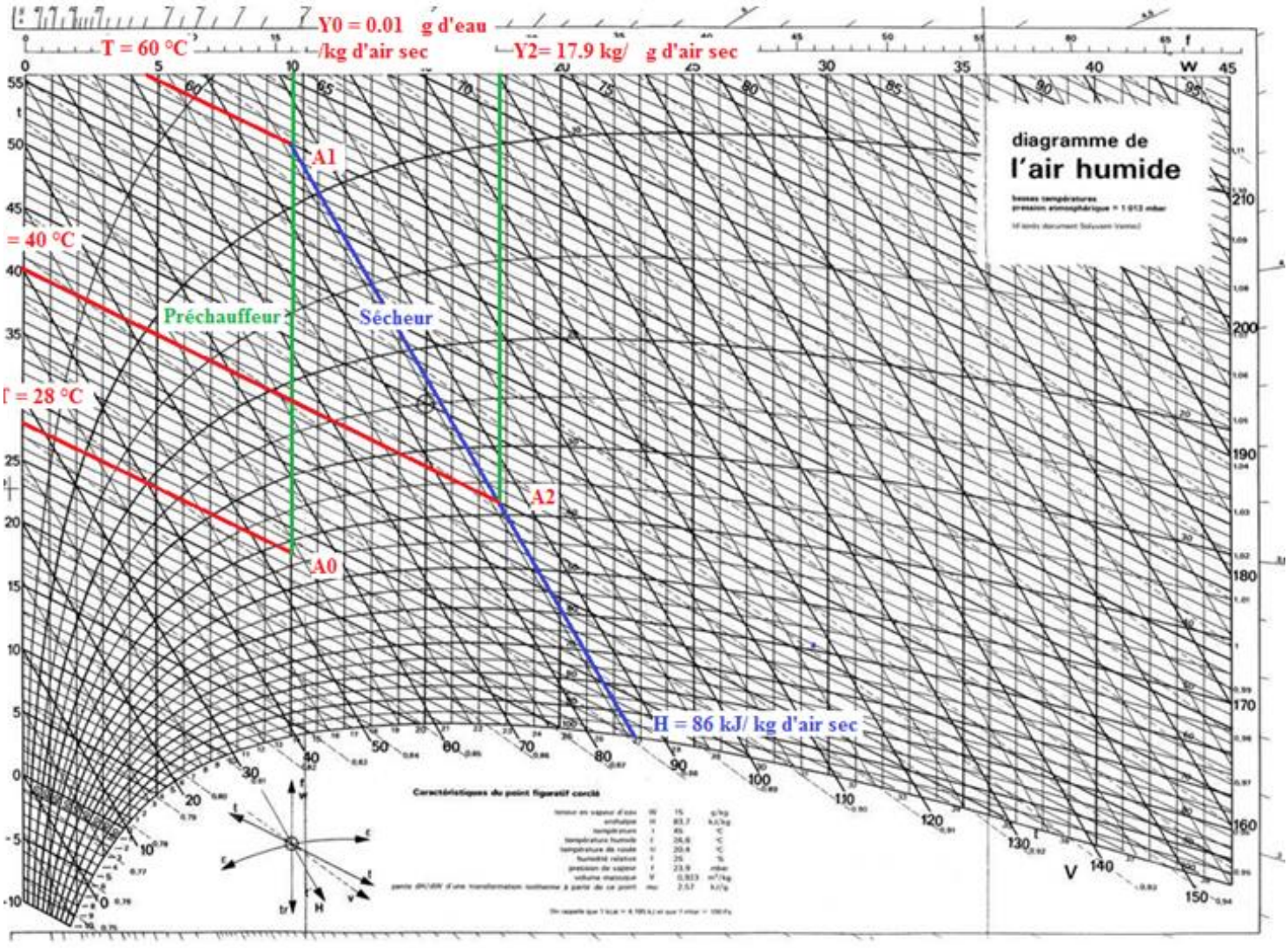
D'après le diagramme d'air humide :

1 kg d'air sec contient : 17.9 – 10 = 7.9 g d'eau vapeur = 7.9 10^{-3} kg d'eau vapeur

1 kg d'air sec contient ⟶ 7.9 10^{-3} kg d'eau vapeur

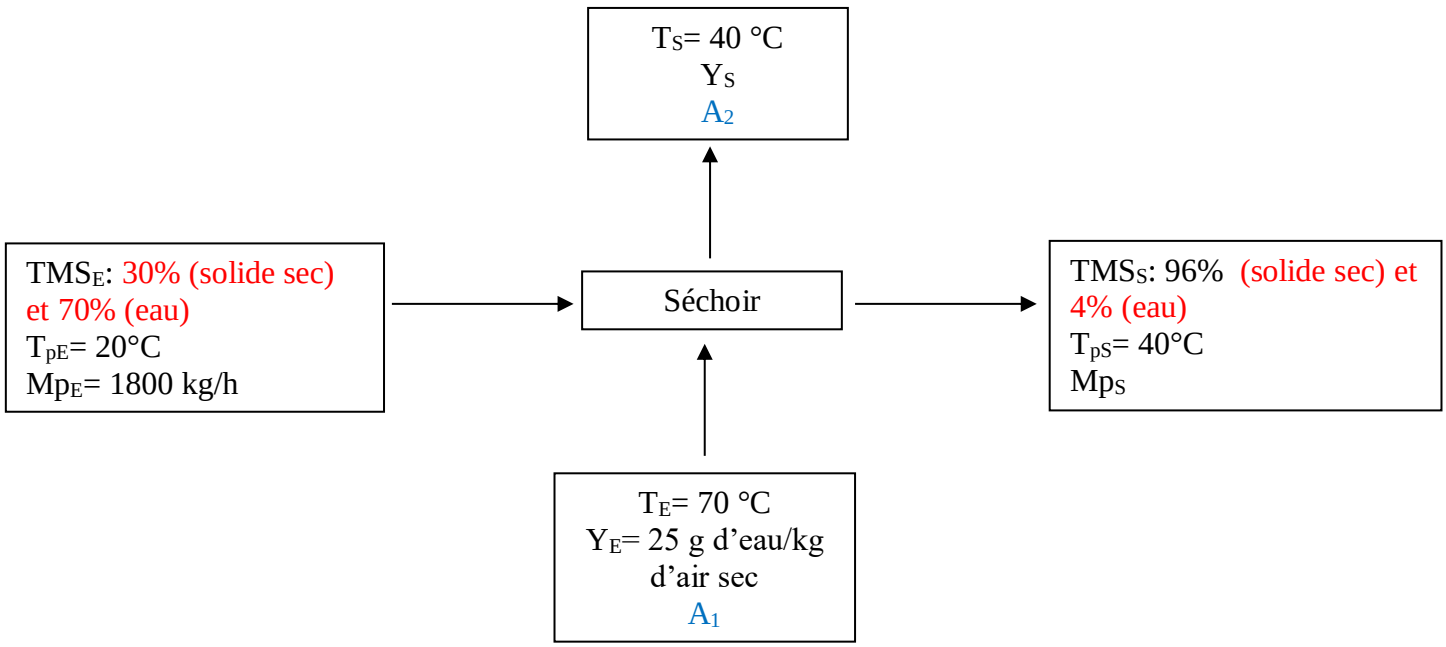
X ⟶ 1000 kg d'eau vapeur/h

$$\Rightarrow X = \frac{1000}{7.9\ 10^{-3}} = 126582.27 \text{ kg/h}$$



Exercice 02 :

Un sécheur continu à lit fluidisé à contre-courant déshydrate des levures de boulangerie de 70% à 4%. L'air utilisé à l'entrée est à T_1= 70 °C et Y = 25 g d'eau/kg d'air sec et quitte le sécheur à T_2 = 40 °C. Le produit entre à 20 °C avec un débit de 1800 kg/h et sort à 40 °C.



Calculer le débit d'air sec nécessaire au chauffage sachant que durant le séchage, il n'y a pas de perte de chaleur à travers les parois du sécheur.

Durant le séchage, il n'y a pas de perte de chaleur à travers les parois du sécheur => H constante.

Le taux de matière sèche (TMS) : c'est le titre massique en solide dans le produit à sécher.

$$TMS = \frac{\text{masse de matière sèche (solide sec)}}{\text{masse du produit à sécher}} = \frac{M_S}{Mp \text{ à sécher}}$$

Masse du solide sec à l'entrée = masse du solide sec à la sortie

$TMS_E \times Mp_E = TMS_S \times Mp_S$

$0.3 \times 1800 = 0.96 \times Mp_S$ $\quad \Rightarrow Mp_S = \frac{0.3 \times 1800}{0.96} = 562.5$ kg/h

Le liquide éliminé de la phase solide et capté par la phase gaz lors du séchage => V (débit d'eau éliminé par le sécheur) = Ma ($Y_S - Y_E$) = Ms ($TH_E - TH_S$)

Ms = masse du produit sec = $0.3 \times 1800 = 540$ kg/h

Où : Ms = $0.96 \times 562.5 = 540$ kg/h

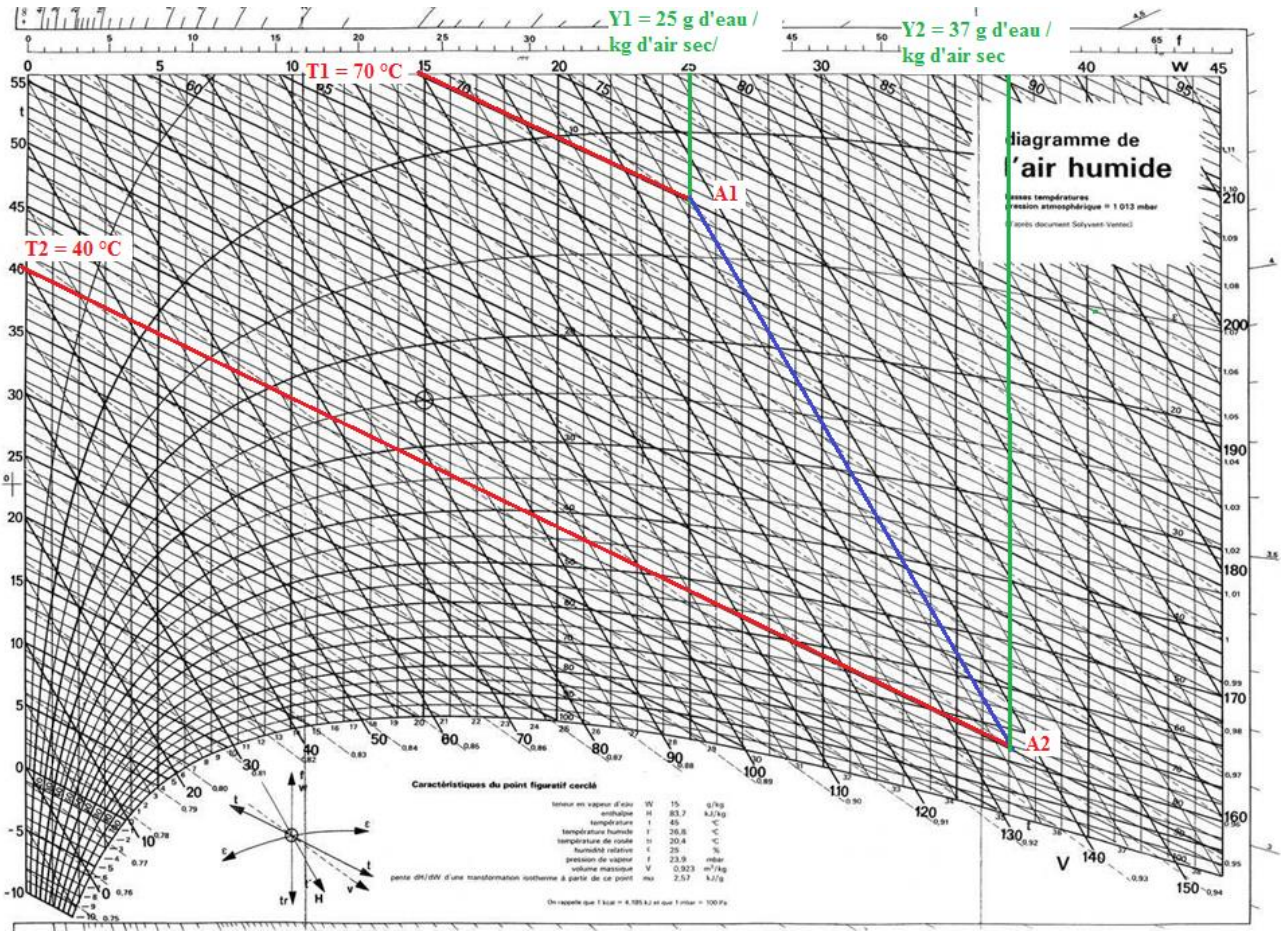
Calcul de TH_E et TH_S :

$$TH_E = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse du solide sec}} = \frac{0.7}{0.3} = 2.333 \frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg du solide sec}}$$

$$TH_S = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse du solide sec}} = \frac{0.04}{0.96} = 0.04167 \frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg du solide sec}}$$

$$\text{D'où : } Ma = \frac{Ms\,(TH_E - TH_S)}{(Y_S - Y_E)} = \frac{540\,(2.333 - 0.04167)}{(0.037 - 0.025)} = 103109.85 \text{ kg d'air sec/h}$$

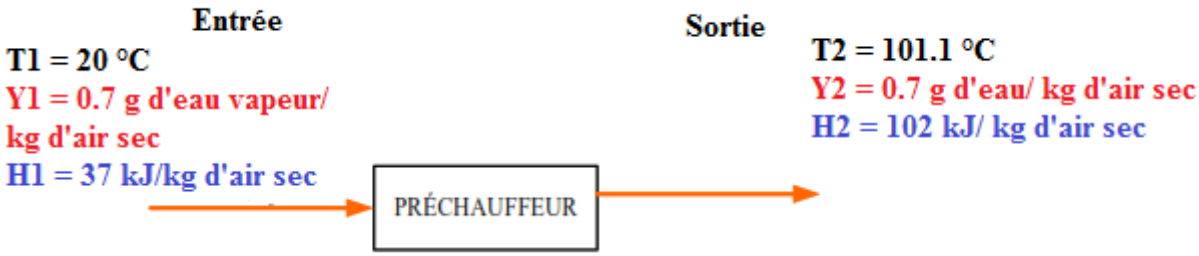
Y_S à déterminer graphiquement (Y_S = 37 g d'eau vapeur/ kg d'air sec)



Exercice 03 :

Préchauffeur : de l'air ambiant déshumidifié entre à une température de 20°C et une humidité relative H_R=5%. Son débit global est 1.08×10^4 m^3/h, sa masse volumique 1.2 kg/m^3.

- Déterminer l'humidité absolue de l'air à l'entrée Y_1 et à la sortie Y_2 du préchauffeur ?



De l'air à 20 °C et H_R = 5%, contient Y_1 = 0.7 g d'eau vapeur/ kg d'air sec (d'après le tableau des données).

Lors de son chauffage dans le préchauffeur, sa composition ne change pas => $Y_2 = Y_1$ = 0.7 g d'eau vapeur/ kg d'air sec.

- Calculer le débit massique d'air humide ?

Le débit volumique de l'air est 1.08×10^4 m^3/h, sa masse volumique 1.2 kg/m^3 => son débit massique est donc :

$$\text{masse volumique} = \frac{\text{débit massique (m)}}{\text{débit volumique (V)}}$$

=> Débit massique (m) = masse volumique x débit volumique (V)

=> Débit massique (m) = 1.2 x 1.08×10^4

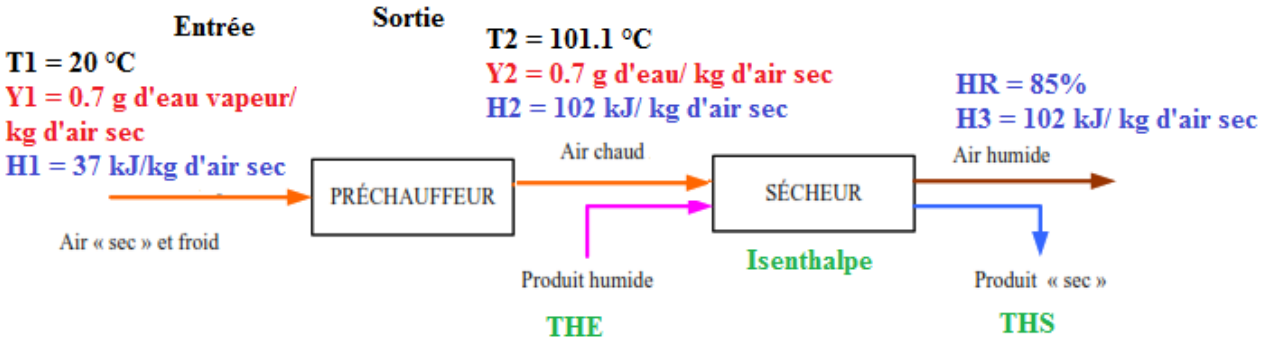
=> Débit massique (m) = 12960 kg/h

- Si la température de l'air en sortie du préchauffeur est de 101.1 °C, en déduire son humidité relative H_R et son enthalpie H_2 ?

D'après le tableau 2 des données : T = 101.1 °C correspond H_R = 10% et H_2 = 102 kJ/ kg d'air sec.

Sécheur : l'air chaud alimente un sécheur rotatif à tambour à contre-courant. Le débit de solide humide entrant dans le sécheur est 35000 kg/.h, et son titre massique en eau est 1%. On admet que le séchage s'effectue dans des conditions isenthalpique pour l'air, et que son humidité relative en sortie est H_R =85%.

- Connaissant H_R à la sortie, déterminer la température et l'humidité absolue Y_3 de l'air en sortie du sécheur ?



Le sécheur est isenthalpe => H constante => H_3 = 102 kJ/ kg d'air sec.

Son H_R = 85%, et d'après les données du tableau 3, on a :

Y_3 = 26.9 g d'eau vapeur/ kg d'air sec.

T_3 = 32.5 °C.

- Calculer l'humidité du solide entrant TH_E, et le débit de solide sec Ms ?

Titre massique en eau 1% => masse d'eau 1% et masse du solide 99%.

$$TH_E = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse du solide sec}} = \frac{1\%}{99\%} = \frac{0.01}{0.99} = 0.0101 \ \frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg du solide sec}}$$

Le débit du solide humide entrant : $Mp_E = M_S + M_S \times TH_E$

$$\Rightarrow \quad Mp_E = M_S (1 + TH_E)$$

$$\Rightarrow \quad Ms = \frac{Mp_E}{(1+ TH_E)} = \frac{35000}{(1+0.0101)} = 34650 \ kg/h$$

- Déterminer, pour le solide en sortie, le taux d'humidité TH_S ?

L'eau cédée par le solide = l'eau captée par l'air

$$V = Ma\ (Y_S - Y_E) = M_S\ (TH_E - TH_S)$$

$$\Rightarrow TH_S = TH_E - \frac{Ma\ (Y_S - Y_E)}{Ms}$$

$$\Rightarrow TH_S = 0.0101 - \frac{12960\ (0.0269 - 0.007)}{34650}$$

$$\Rightarrow TH_S = 3\ 10^{-4} \text{ kg d'eau/ kg d'air sec}$$

Données : Tableaux des propriétés de l'air extraites du diagramme de l'air humide.

Tableau 1		
H_R	Y	T
5	0.2	5
5	0.3	10
5	0.4	15
5	0.7	20
5	1	25
5	1.3	30
5	1.7	35
5	2.3	40
5	3	45
5	3.9	50
5	5	55

Tableau 2			
Y	T	H_R	H
0.7	76	50	78
0.7	81	30	82
0.7	86	25	87
0.7	91	20	93
0.7	96	15	97
0.7	101	10	102
0.7	106	<10	108
0.7	111	<10	113
0.7	116	<10	118
0.7	121	<10	123
0.7	126	<10	128

Tableau 3			
H_R	H	Y	T
85	74	18.5	26.3
85	78	19.8	27.4
85	82	20.8	28.3
85	86	22	29.2
85	90	23.1	30
85	94	24.3	30.9
85	98	25.8	32
85	102	26.9	32.5
85	106	28.1	33.2
85	110	29.3	34
85	114	30.4	34.8

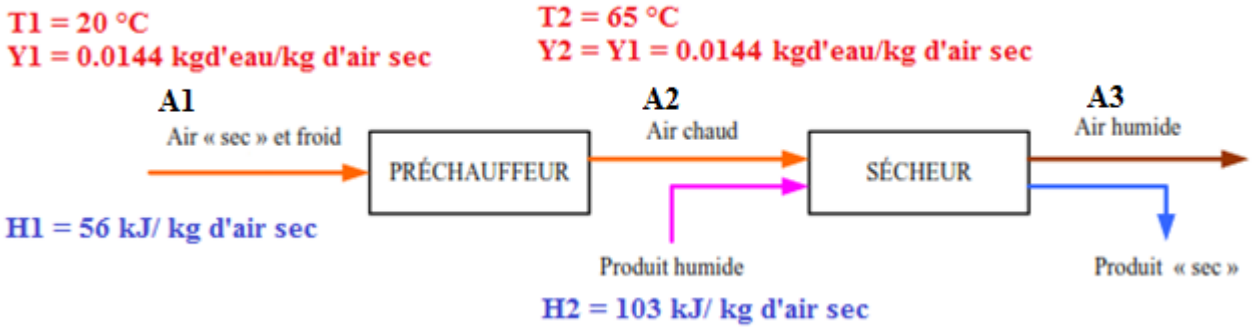
Exercice 04 :

On sèche en continu dans un sécheur de type tunnel un solide humide avec de l'air à contre courant. L'air est préalablement réchauffé dans un préchauffeur : (Voir les données en annexe 2)

- Représenter sur le diagramme de l'air humide les points figuratifs de l'air, et déterminer H à l'entrée et à la sortie du préchauffeur ?

Connaissant les deux propriétés Y_1 = 0.0144 kg/ kg d'air sec et T_1 = 20 °C, on place les points sur le diagramme de l'air humide et on lit son enthalpie => H_1 = 56 kJ/ kg d'air sec.

Sachant que dans le préchauffeur, l'air ne change pas de composition $Y_2 = Y_1$ = 0.0144 kg/ kg d'air sec et T_2 = 65 °C, on place le point correspondant sur le diagramme de l'air humide et on lit son enthalpie => H_2 = 103 kJ/ kg d'air sec.



- En considérant le séchoir comme parfaitement adiabatique, déterminer l'humidité absolue maximale de l'air en sortie du sécheur ? déterminer T_h ?

Le séchoir comme parfaitement adiabatique => H constante.

Y_{max} est déterminée à la saturation, c'est donc l'intersection de H_2 = 103 kJ/ kg d'air sec et la courbe de saturation H_R = 100%.

Cela donne : Y_{max} = 28.2 g d'eau / kg d'air sec.

Th = 30.7 °C.

- Déterminer le débit du solide sec et le débit du solide sec sortant ?

Le débit du solide sec :

$Mp_E = M_S + M_S \times TH_E$ => $Mp_E = M_S (1 + TH_E)$

=> $M_S = Mp_E / (1 + TH_E)$

=> $M_S = 0.075 / (1 + 0.92) = 0.0391$ kg/s

Le débit du solide sec sortant :

$Mp_S = M_S + M_S \times TH_S$ => $Mp_S = M_S (1 + TH_S)$

=> $Mp_S = 0.0391 (1 + 0.05) = 0.041$ kg/s

- Déterminer le débit d'air sec ? Déterminer Y de l'air en sortie et comparer avec obtenue graphiquement ?

$Ma_E = Ma + Ma \times Y_E = Ma (1 + Y_E)$ ..... (1)

$Ma_S = Ma + Ma \times Y_S = Ma (1 + Y_S)$ ..... (2)

De (1) : => $Ma = Ma_E / (1 + Y_E)$

=> $Ma = 2.5 / (1 + 0.0144) = 2.464$ kg/s

De (2) : => $Y_S = (Ma_S / Ma) - 1 = 0.0282 = 28.2$ kg d'eau / kg d'air sec

$Y_S = Y_3$ = C'est la même valeur que celle obtenue graphiquement.

- Déterminer les débits d'eau pour l'air et le solide à l'entrée et à la sortie du séchoir ?

Pour l'air :

Débit d'eau entrant = $Ma\ Y_E = 2.464 \times 0.0144 = 0.0355$ kg/s

Débit d'eau sortant = $Ma\ Y_S = 2.464 \times 0.0282 = 0.0695$ kg/s

Pour le solide :

Débit d'eau entrant = $M_S\ TH_E = 0.0391 \times 0.92 = 0.0359$ kg/s

Débit d'eau sortant = $M_S\ TH_S = 0.0391 \times 0.05 = 0.002$ kg/s

- A l'aide du diagramme de l'air humide, donner la température de l'air à la sortie du séchoir ?

La température de l'air à la sortie du séchoir T_3 = 30.7 °C.

Air		Solide	
Débit d'air sec entrant kg/s	Ma_E = 2.5	Débit de solide humide entrant kg/s	Mp_E = 0.075
Humidité absolue d'air entrant kg/kg	Y_1 = 0.0144	Teneur en eau dans le solide entrant kg/kg	TH_E = 0.92
Température avant préchauffeur °C	T_1= 20	Température entrée °C	22
Température après préchauffeur °C	T_2= 65	Température sortie °C	22
Debit d'air humide sortant kg/s	Ma_S = 2.534	Teneur en eau dans le solide sortant kg/kg	TH_S = 0.05

