

Séchage thermique

Chapitre 2

Principes de calcul des sécheurs:

Principes physiques du séchage

Le but du séchage est de déshydrater un produit de façon à abaisser sa teneur en eau en-dessous d'une valeur permettant sa conservation à température ambiante. Le séchage provoque également des modifications d'aspect, de goût, de texture et de qualité nutritionnelle du produit.

Pour abaisser la teneur en eau d'un produit, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre :

- Séchage par ébullition
- Séchage par entraînement.

Séchage par ébullition (Sans mouvement de l'air)

Consiste à transmettre au produit amené à sa température d'ébullition (évaporation) un flux thermique au travers une surface d'échange. L'évaporation de l'eau est directement proportionnelle à l'apport d'énergie (chaleur latente de vaporisation). En pratique la température est comprise entre 130 et 150°C.

Séchage par entraînement (Avec mouvement de l'air)

Consiste à placer un corps humide dans un courant d'air (ou autre gaz) suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre le corps et le gaz un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

- Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit, sous l'effet de la température
- Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de la pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit (Figure 3)

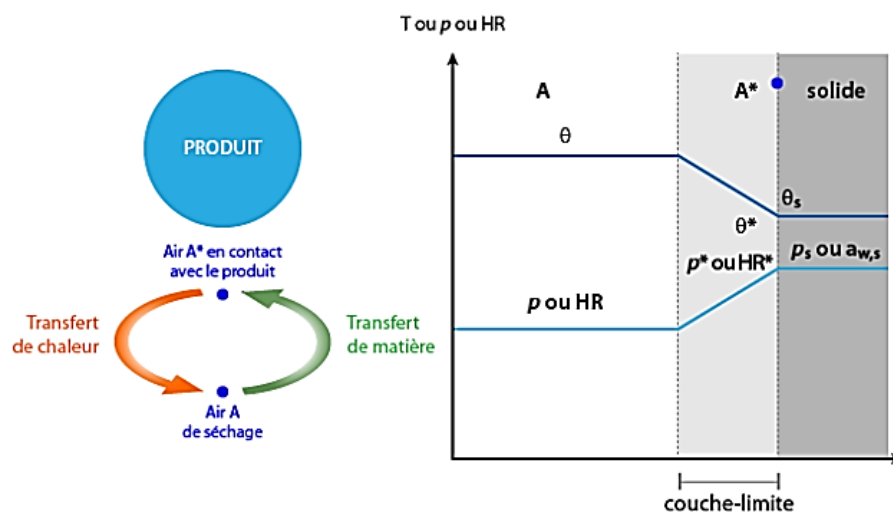


Figure 3 : Transfert entre l'air et la surface du produit

Remarque :

Dans un produit l'eau existe sous deux formes :

- *L'eau de structure* : qui entre dans la constitution du produit son élimination détruit la structure et la nature du produit.
- *L'eau libre* : sa diminution ou élimination n'influe pas sur la structure du produit (c'est la partie concerné par le séchage thermique), mais elle influe sur le goût, le couleur et la forme.

Le séchage par entraînement est le moyen de séchage le plus utilisé surtout pour les produit du secteur alimentaires (lait, œuf, charcuterie, céréales et produits végétaux, fruits, etc...).

Teneur en eau ou humidité

Pour un tel produit on peut écrit:

- ✓ m : Masse du produit **Kg**
- ✓ m_e : Masse de l'eau (libre) dans le produit en **Kg_{eau}**
- ✓ m_s : Masse sèche (masse du produit sans l'eau libre) en **Kg_{ms}**

$$m = m_e + m_s$$

Comme pour l'air humide on définit l'humidité ou la teneur en eau d'un produit en base sèche exprimé en **Kg_{eau}/Kg_{ms}** par :

$$w = \frac{m_e}{m_s}$$

La teneur en eau d'un produit est parfois définie en base humide :

$$m_c = \frac{m_e}{m}$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations suivantes :

$$w = \frac{m_c}{1 - m_c}, m_c = \frac{w}{1 + w}$$

Exemple :

La teneur en eau du maïs après récolte est $W_i = 0,54$. On veut le sécher jusqu'à obtenir une teneur en eau finale $W_f = 0,18$.

Calculer la masse de maïs obtenue après séchage de 100 kg de maïs frais.

Solution :

Nous avons :

Avant séchage (initial)	Après séchage (finale)
$m_i = 100Kg$	$m_f = ? Kg$
$W_i = 0,54$	$W_f = 0,18$
$m_i = m_{ei} + m_s$	$m_f = m_{ef} + m_s$

Masse de la matière sèche reste constante avant et après le séchage $m_{si} = m_{sf} = m_s = \text{Const}$

On a par définition

le teneur initiale

$$W_i = \frac{m_{ei}}{m_s} = \frac{m_i - m_s}{m_s} = \frac{m_i}{m_s} - 1 \text{ d'ou } m_s = \frac{m_i}{1 + w_i} = \frac{100}{1 + 0,54} = 64,9 \text{ kg}$$

Le teneur finale

$$W_f = \frac{m_{ef}}{m_s} \Rightarrow m_{ef} = W_f m_s = 0,18 \times 64,9 = 11,7 \text{ kg}$$

La masse du maïs obtenue après séchage est :

$$m_f = m_{ef} + m_s = 11,7 + 64,9 = 76,6 \text{ kg.}$$

Exemple :

La teneur en eau de la figue après récolte est finale $W_i = 0.5$ On veut le sécher jusqu'à obtenir une teneur en eau finale $W_f = 0.2$.

- ✓ Calculer la masse de la figue fraîche avant le séchage. sachant qu'on a obtenue après séchage 300 kg
- ✓ Calculer la quantité d'eau enlevée par le procédé de séchage.

Solution :

- ✓ Masse de figue après séchage :

On a le teneur en eau initiale

$$W_i = \frac{m_{ei}}{m_s} \text{ et } m_i = m_{ei} + m_s \Rightarrow m_{ei} = m_i - m_s$$

$$W_i = \frac{m_{ei}}{m_s} = \frac{m_i - m_s}{m_s} = \frac{m_i}{m_s} - 1 \Rightarrow m_s = \frac{m_i}{W_i + 1} = \frac{300}{0.5 + 1} = \mathbf{200kg}$$

On a : $m_f = m_{ef} + m_s$ et $W_f = \frac{m_{ef}}{m_s} \Rightarrow m_{ef} = W_f m_s$

La masse de la figue finale sera

$$m_f = m_{ef} + m_s = W_f m_s + m_s = m_s (W_f + 1)$$

$$m_f = 200(0.2 + 1) = \mathbf{240Kg}$$

- ✓ Quantité d'eau enlevée par le procédé de séchage.

$$\Delta m_e = m_i - m_f = 300 - 240 = \mathbf{60Kg}$$

Activité de l'eau dans un produit a_w

L'activité de l'eau est le rapport entre la pression de vapeur d'eau à la surface du produit et la pression de la vapeur d'eau sur la surface plane d'un liquide à la même température.



Figure 4 : Représentation de l'activité de l'eau

$$a_w = \frac{P_v}{P_{sat}(T)}$$

Considérons maintenant un produit et un air en équilibre l'un avec l'autre P_v, T, P_{va} et T_a étant respectivement les pressions de vapeur d'eau et les températures du produit et de l'air. L'équilibre impose :

- $T = T_a$: pas de transfert de chaleur

- $P_v = P_{va}$: pas de transfert de masse

Or l'humidité relative de l'air s'écrit :

$$HR = 100 \frac{P_v}{P_{sat}(T)} \text{ d'où } HR = 100 a_w$$

L'activité de l'eau dans un produit est donc également l'humidité relative d'un air en équilibre avec le produit.

Remarque :

Pour qu'un produit puisse se conserver à température ambiante, son activité a_w doit être abaissée en-dessous de 0,6 (les moisissures ne peuvent plus se développer, Annexe A.1).

Principe du séchage

Un air sec et suffisamment chaud est ventilé pour qu'un échange de chaleur et d'humidité s'effectue entre cet air et le produit.

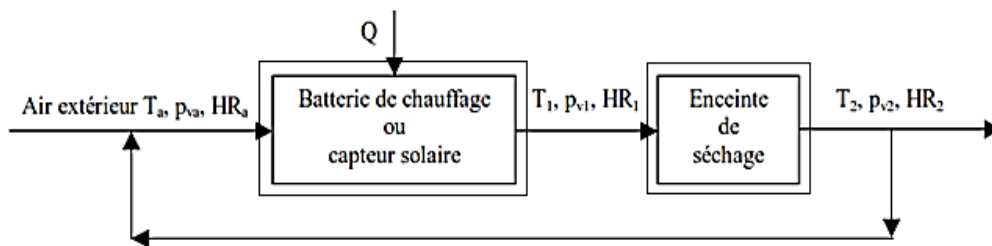


Figure 4 : Schéma de principe d'un séchoir convectif

L'air subit d'abord un échauffement à pression constante dans une batterie de chauffage puis une humidification quasi-adiabatique dans l'enceinte de séchage. On a les relations $T_a < T_1, T_2 < T_1, X_2 < X_1$ et $T_{h2} = T_{h1}$ si l'enceinte de séchage est parfaitement isolée. Les valeurs des différentes températures (sèche, humide, de rosé) et humidité (relative, absolue) sont calculables par utilisation d'un diagramme de l'air humide.

L'air

- ✓ Air extérieur (T_a, P_{va} et HR_a) subit d'abord les évolutions suivante
 - Un échauffement à pression constante $Q = C_p \Delta T$ et $T_1 > T_a$
 - Une humidification quasi-adiabatique $HR_a < HR_{a1}$
- ✓ Air entre avant l'enceinte de séchage (T_1, P_{va1} et HR_{a1}) subit les évolutions suivante
 - $HR_{a2} > HR_{a1}$
 - $T_2 < T_1$ et $T_{h1} < T_{h2}$

Cinétique du séchage

- Placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et voir l'évolution de sa masse au cours du temps.

Deux types de courbes permettent de décrire l'évolution du produit au cours du séchage :

- la teneur en eau sèche moyenne (X) du produit, en fonction du temps (t) obtenue directement à partir de l'enregistrement de la masse au cours du temps, connaissant la teneur en eau initiale du produit ;
- la vitesse de séchage ($-\frac{dX}{dt}$) en fonction de la teneur en eau base sèche (X).

Les courbes théoriques, obtenues pour des produits non hygroscopiques et peu déformables comme, par exemple, la cellulose, permettent classiquement de distinguer trois périodes (Figure 6) :

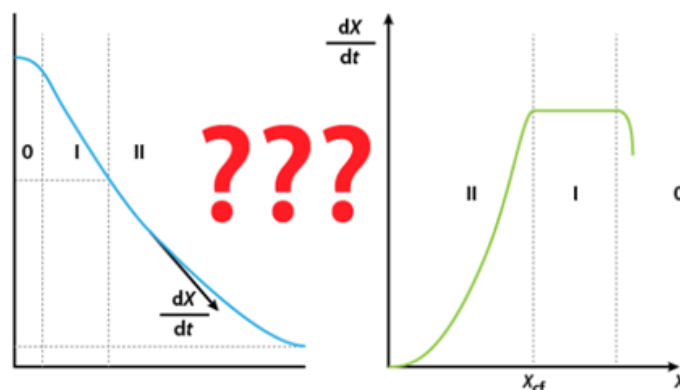


Figure 5 : Courbes théoriques caractérisant un séchage par entraînement

- une période 0 de mise en température du produit, qui disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles ;

- une **période 1 de séchage à vitesse constante**, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l' a_w dans le produit en surface reste proche de 1, et le séchage est contrôlé par les transferts externes. Pendant toute cette période, la température du produit est uniforme et égale (par définition) à la température du thermomètre humide (θ_h) de l'air, c'est-à-dire la température de l'air de séchage. À la fin de cette période 1, la teneur en eau critique du produit peut être déterminée ;
- une **période 2 de séchage à vitesse décroissante** où la surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l' a_w en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de matière deviennent limitant. La température du produit augmente à partir de sa surface. La teneur en eau base sèche du produit diminue jusqu'à atteindre une valeur limite (X_{lim}) qui dépend des conditions de l'air de séchage (température et humidité relative).

Bilan sur les séchoirs

Un séchoir par entraînement, avec son élément de chauffage, est représenté **Figure 7**.

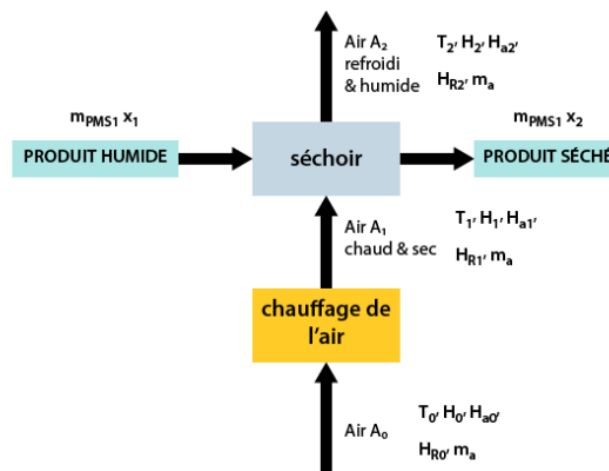


Figure 6 : Transfert entre l'air et la surface du produit

Les bilans s'écrivent sur la base des débits constants de matière sèche (m_{PMS}) et d'air sec (m_a).

Les teneurs en eau sont exprimées en kg d'eau/ kg d'air sec pour l'air et en kg d'eau/ kg de matière sèche (MS) pour l'aliment.

Tenant en compte que l'eau que perd le produit est gagné par l'air, le débit d'eau

$$m_e = \dot{m}_a(H_{a2} - H_{a1}) = \dot{m}_{PMS}(X_1 - X_2) \quad (9)$$

Et si le séchage est isenthalpique : $H_1 = H_2$

En réalité, ces bilans sont le plus souvent faussés par :

- des entraînements de particules ;
- des fuites ou des entrées d'air ;
- et surtout des pertes énergétiques par les parois du séchoir et lors de l'échauffement du produit (périodes 0 et 2). Ils constituent néanmoins une bonne base de calcul.

Pour un séchoir par ébullition, on ne conserve que le calcul du débit d'eau à partir du bilan de matière sèche.

Le bilan énergétique est calculé à partir de l'équation théorique $\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_v$, à laquelle il convient d'ajouter la puissance nécessaire à l'échauffement du produit et les diverses pertes.

Consommation énergétique

La **Consommation Énergétique Massique (CEM)** d'un séchoir est définie comme étant la quantité de chaleur (J/kg) à lui fournir pour sécher 1 kg d'eau. Cette grandeur permet de comparer des séchoirs sur une base indépendante du tonnage d'eau évaporée.

Rapport de Consommation Énergétique (RCE) est le rapport : $\frac{CEM}{H_v(T)}$, avec $H_v(T)$ étant l'énergie latente de vaporisation de l'eau à la température moyenne (T) du produit, pendant le séchage. Ce rapport permet aussi de déterminer la masse de vapeur nécessaire pour vaporiser 1 kg d'eau, en prenant $H_v(T)$ à la température à laquelle se condense la vapeur utilisée.

Le Tableau 3 donne des ordres de grandeur des valeurs de CEM et de RCE en fonction des modes de séchage.

Types d'installation	CEM (KJ / Kg d'eau)	RCE (Kg de vapeur / Kg d'eau)
Séchoirs par entraînement (sans récupération)	3300 à 6500	1,5 à 3
Séchoirs par ébullition (ou entraînement avec récupération)	2400 à 3300	1,1 à 1,5
VES* + compression	160 à 200	0,07 à 0,09
Évaporateurs à multiples effets	250 à 1200	0,13 à 0,5

*VES : Vapeur d'eau surchauffée

Pour améliorer l'efficacité énergétique des séchoirs, on peut :

- réduire les pertes par les parois ou les fuites,
- saturer l'air sortant au maximum,
- utiliser un air à température la plus élevée que possible (sans altérer profondément la qualité du produit),
- procéder par chauffages multiples de l'air,
- recycler une partie de l'air.

Caractéristiques techniques et applications des principaux types de séchoirs en industrie agro-alimentaire

En industrie agro-alimentaire la sélection d'un séchoir doit tenir en compte du comportement mécanique du produit initial (liquide, solide, pompable, fragile, etc...) et final (poudre, morceaux, etc...), de sa sensibilité à la chaleur, des modes de manipulation, des débits à traiter, de l'énergie disponible, etc...

Les appareils de séchage ont été développés pour sécher les produits soit de façon continue, soit de façon discontinue. Pour ce qui concerne le premier cas, de grands débits d'air sont exigés comme dans le cas de séchage par atomisation ou en lit fluidisé (levures de boulangeries). Les sécheurs discontinus sont utilisés pour des produits saisonniers (fines herbes).

Remarque :

On peut aussi dire pour "lit fluidisé" : "lit fluidifié".

Qualité des produits séchés

La plupart des produits biologiques sont profondément modifiés par le séchage (couleur, goût, texture, qualité nutritionnelle, propriétés techno-fonctionnelles, etc.). Les conditions de séchage et leurs variations peuvent ainsi altérer le produit, ou lui conférer des propriétés nouvelles (formulation, texturation). Il est ainsi important que l'utilisateur puisse définir les propriétés attendues du produit et que l'on sache, ensuite, lier les altérations, ou les modifications, aux paramètres pertinents du séchage.

- En **séchage convectif**, la température d'attaque de l'air est généralement limitée puisque l'utilisation d'une température élevée peut détruire certaines vitamines, dénaturer les

protéines, favoriser ou inhiber des réactions enzymatiques induisant des pertes de la qualité nutritionnelle du produit et/ou des changements de la couleur et le goût, etc...

Un séchage par ébullition provoque, quant à lui, une expansion du produit et l'apparition d'une porosité interne.

- Le séchage provoque diverses altérations physiques et mécaniques du produit, qui se traduit par des modifications de la taille et de la forme des produits. L'intensité de ces phénomènes dépend fortement de la mobilité de l'eau dans le solide et de la vitesse de séchage.

Les mêmes phénomènes permettent d'expliquer la formation d'une croûte en surface des produits qui est :

- souhaitée dans le cas des céréales pour le petit-déjeuner, qui doivent rester croustillantes dans le bol, ou lors de la micro-encapsulation d'arômes, pour éviter leur volatilisation ;
- indésirable, si le produit doit pouvoir être réhydraté rapidement, ultérieurement.

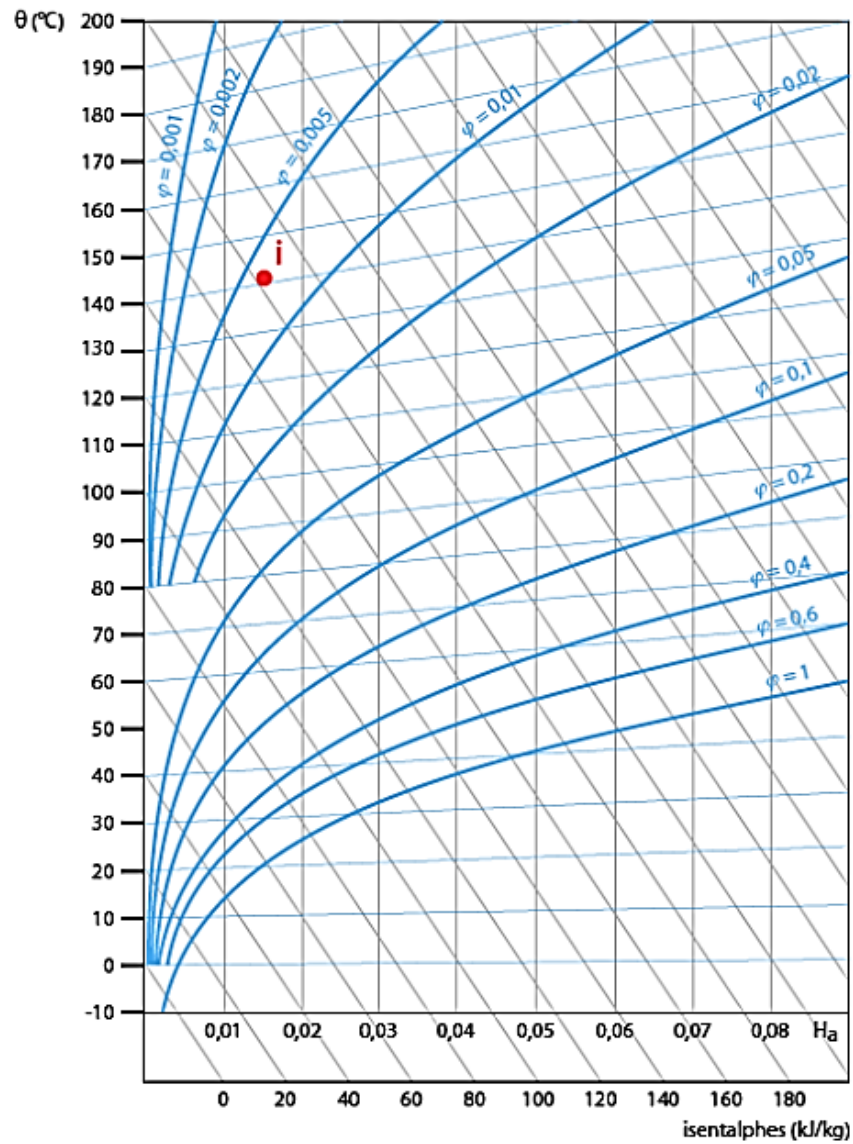
Enfin, il est à signaler que le séchage ne chauffe que légèrement le produit ; ainsi, ni les enzymes, ni les bactéries ne sont totalement détruites.

Il convient notamment dans le cas des légumes de les blanchir afin de détruire les enzymes. Dans le cas des produits laitiers, des soupes, ... une pasteurisation est souvent nécessaire pour la destruction des micro-organismes, puisque lors de la déshydratation, ces micro-organismes peuvent se développer dans le produit.

Exercice 1

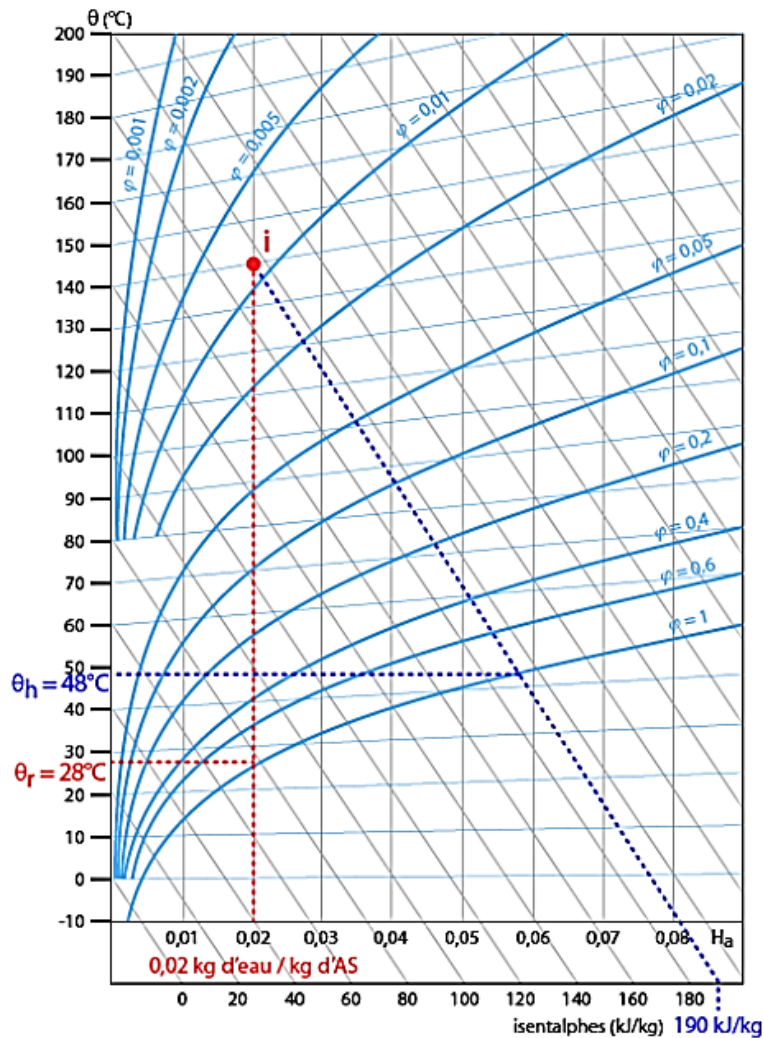
Déterminer pour le point « i » représenté sur le diagramme enthalpique de l'air humide, les paramètres suivants :

Humidité absolue (H_a), température du thermomètre humide (T_h), température de rosée (T_r) et son enthalpie (H).



Solution

- $H_a = 0,02$ kg d'eau/kg d'air sec
- Enthalpie $H = 190$ kJ/kg
- Température du thermomètre humide $T_h = 48^{\circ}\text{C}$
- Température de rosée $T_r = 28^{\circ}\text{C}$



Exercice 2

Un air à l'état (A1) présente les caractéristiques suivantes :

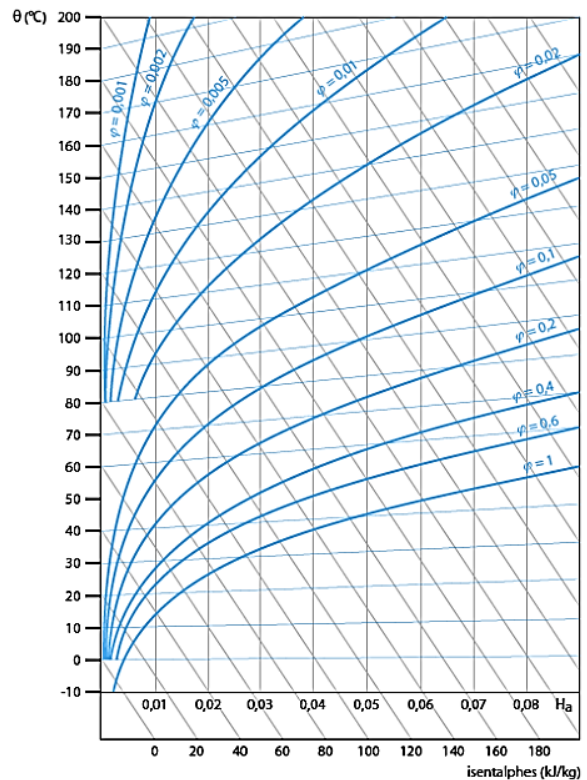
$T_0 = 28\text{ °C}$, $H_{a0} = 0,01\text{ kg eau/kg d'air sec}$.

L'air est chauffé jusqu'à l'état (A1) et atteint la température $T_1 = 98\text{ °C}$.

Il sert à réaliser un séchage adiabatique et sort à une température $T_2 = 58\text{ °C}$ (air à l'état A2).

Question

Déterminer l'humidité absolue H_{a1} et H_{a2} et représenté l'évolution de l'air dans le diagramme de l'AH



Solution

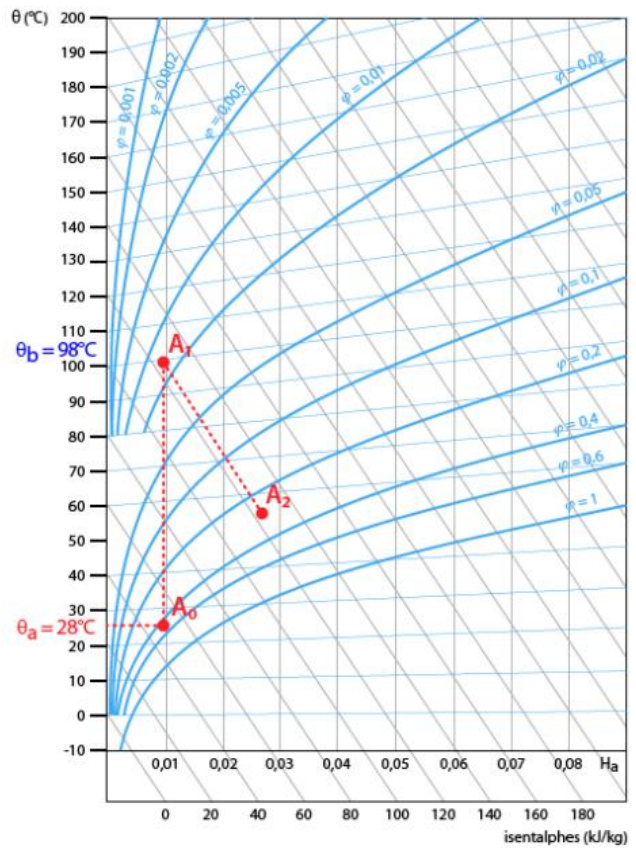
Le chauffage de l'air de A1 à A2 se fait à pression constante et à humidité absolue constante aussi donc $H_{a1} = H_{a0}$. Alors d'après le diagramme de l'AH on obtient :

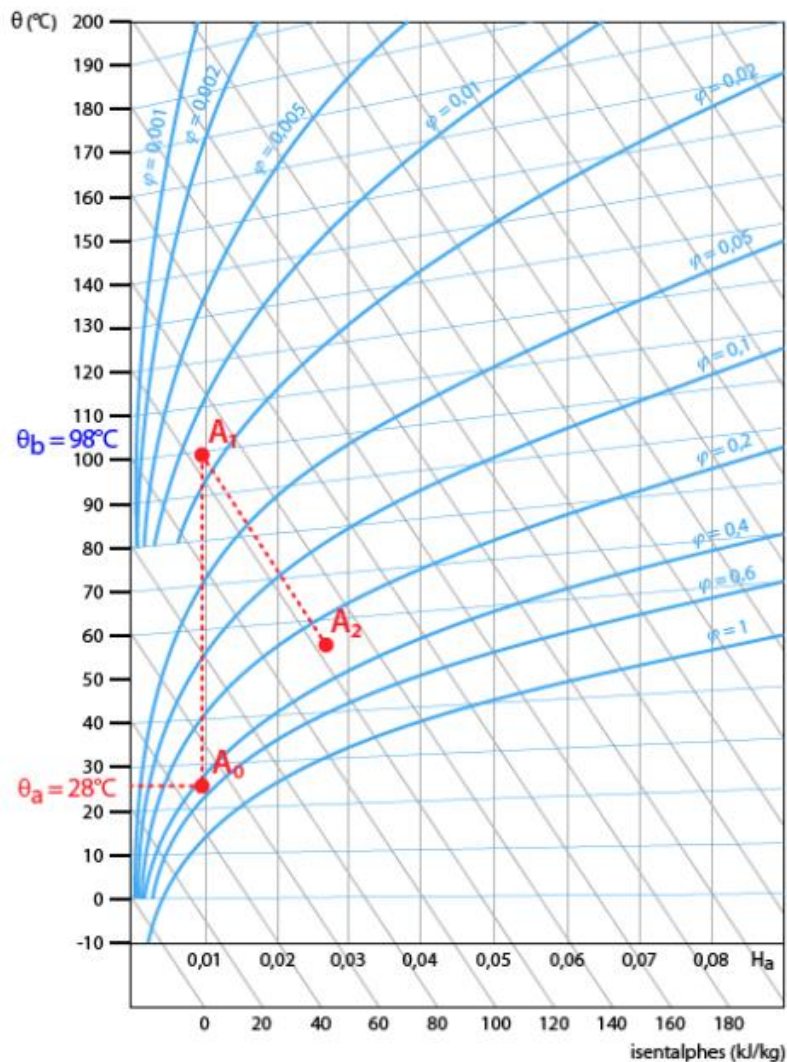
$$H_{a1} = H_{a0} = 0,01 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

$$H_{a2} \approx 0,027 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

Question

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





Solution

D'après le diagramme de l'air humide, 1 kg d'air sec contient 0,017

$$H_{a2} - H_{a1} = 0,027 - 0,01 = 0,017 \text{ kg de vapeur d'eau}$$

Pour évaporer 1000 kg d'eau?

1 kg d'air sec \leftrightarrow 0,017 kg de vapeur d'eau

! $\langle \dots \dots \dots \rangle$ 1000 kg de vapeur d'eau

D'où la quantité d'air sec est égale à $\frac{1000}{0,017} = 58823 \text{ kg}$; soit un débit de 58823 kg/h

Remarque :

Le débit d'air sec peut également être déterminé en appliquant la formule suivante :

$$m_e = m_a(H_{a2} - H_{a1})$$

$$m_a = \frac{m_e}{H_{a2} - H_{a1}} = \frac{m_e}{0,027 - 0,01} = 58823 \text{ kg/h}$$

Exercice 3

Une tour de séchage par pulvérisation traite 2,5 t/h de lait concentré à 48 % de matière sèche (MS), pour faire une poudre à 3 % d'humidité. Le produit entre à 50°C et sort à 75°C.

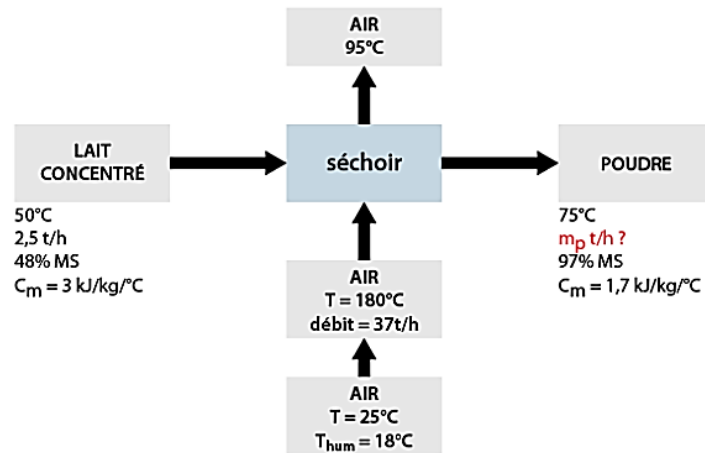
L'air extérieur est à 25°C, avec une température de thermomètre humide ($T_h = 18^\circ\text{C}$). Il est réchauffé à 180°C par une batterie chauffée à la vapeur. Le débit d'air sec à l'entrée est de 37 t/h.

L'air sort à 95°C de la tour.

Les chaleurs massiques du lait concentré et de la poudre sont respectivement de 3 kJ/kg/°C et 1,7 kJ/kg/°C).

Question

Déterminer le bilan matière (débit de poudre et quantité d'eau évaporée)



Solution

En supposant le régime stationnaire et en négligeant les pertes de matière :

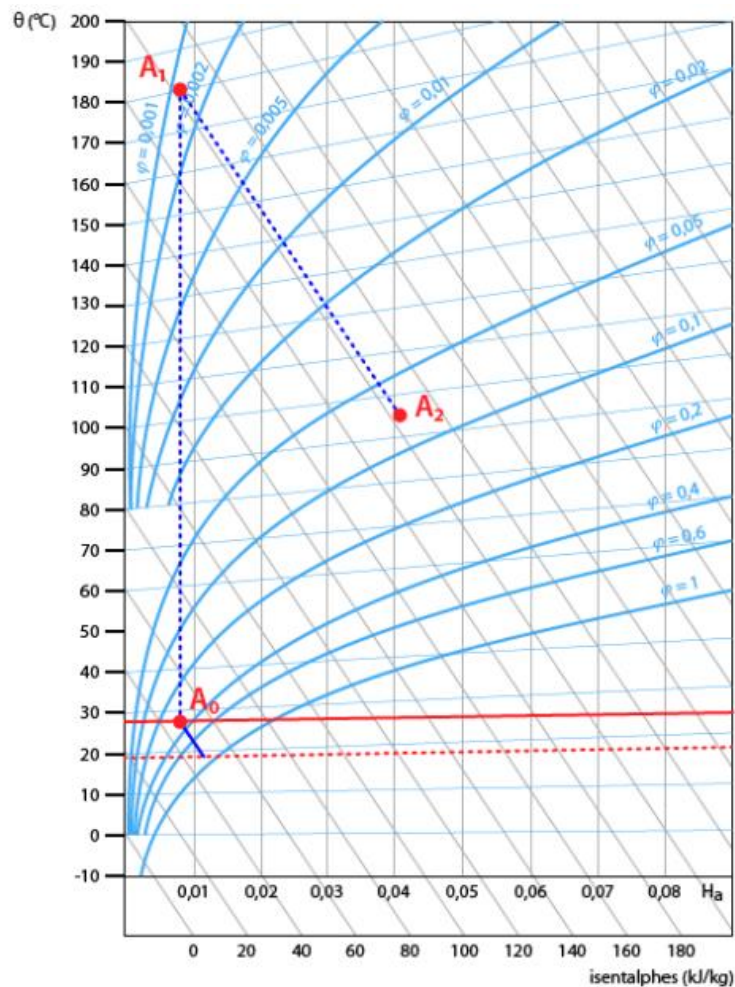
Quantité de MS qui entre = quantité de matière sèche qui sort d'où

$$2500 \times 0,48 = 0,97 \cdot \dot{m}_p \rightarrow \dot{m}_p = \frac{2500 \times 0,48}{0,97} = 1237 \text{ kg/h}$$

- Le débit d'eau évaporé $\dot{m}_e = 2500 - 1237 = 1263 \text{ kg/h}$

Question

Déterminer le bilan thermique ou énergétique



Solution

D'après le diagramme enthalpique de l'air humide, on a : $H_1 = H_2 \approx 210 \text{ kJ/kg}$

- Débit d'énergie de l'air = $\frac{210 \times 37000}{3600} = 2158 \text{ kW}$
- Débit thermique du concentré (\dot{Q}_c)

$$\dot{Q}_c = \dot{m} C_p T = \frac{2500}{3600} 3 \times 50 = 104.2 \text{ kW}$$

- Débit thermique de la poudre (\dot{Q}_p)

$$\dot{Q}_p = \frac{1237}{3600} 1.7 \times 75 = 43.8 \text{ kW}$$

Calcul du bilan

$$\begin{aligned} \sum \text{entrées} &= 2158 + 104,2 = 2262,2 \text{ kW} \\ \sum \text{sorties} &= 2158 + 43,8 = 2201,8 \text{ kW} \\ \sum \text{entrées} - \sum \text{sorties} &\approx 60 \text{ kW} \end{aligned}$$

On trouve un décalage de $\sim 60 \text{ kW}$ qui peut correspondre à des pertes de chaleur par les parois, mais qui peut s'expliquer par les erreurs de mesure, de lecture du diagramme, etc.

Question

Quelle serait l'efficacité énergétique du séchoir ?

[Solution](#)

$H_0 = 50 \text{ kJ/kg}$;

$H_1 = H_2 = 210 \text{ kJ/kg}$

$H_{a0} = H_{a1} = 0,009 \text{ kg d'eau/kg AS}$;

$H_{a2} = 0,044 \text{ kg d'eau/kg AS}$

1 kg d'air sec coûte 160 kJ

$$H_2 - H_0 = 201 - 50 = 160 \text{ KJ}$$

Pendant cette évolution l'air emporte 0,035 kg d'eau

$$H_{a2} - H_{a0} = 0.044 - 0.009 = 0.035 \text{ Kgeau}$$

Alors Pour 160kJ -----> 0,035 kg d'eau

? <----- 1kg d'eau

$$CEM = \frac{160}{0,035} = 4571 \text{ kJ/ kg d'eau Évaporée}$$

$$RCE = \frac{CEM}{\Delta H_v}$$

La température moyenne du produit est de $T_{moy} = 62,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$T_{moy} = \frac{50 + 75}{2} = 62,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

son énergie latente de vaporisation est de $\sim 2353 \text{ kJ/kg}$ d'où :

$$RCE = \frac{4571}{2353} = 1,94 \approx 2$$

On dépense donc le double de l'énergie nécessaire

Remarque :

H_0 et H_1 peuvent également être déterminées à partir de l'équation suivante :

$$H_1 = 2494 H_a + T(1,01 + 1,92 H_a)$$

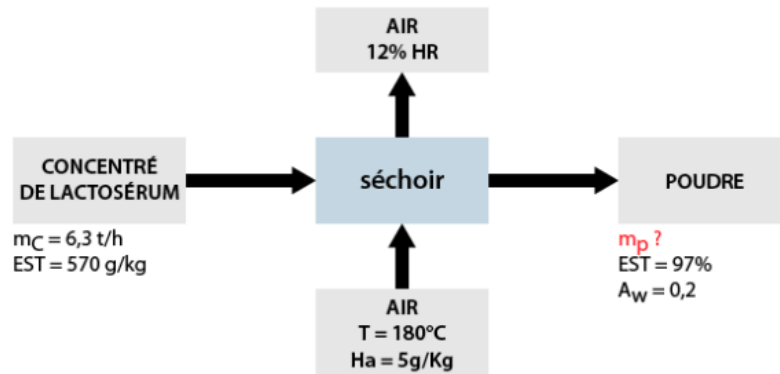
Avec $H_a \sim 0,009$; $T = 25$ pour H_0 et $T = 180$ pour H_1 ; ce qui donne :

$$H_0 \sim 48,1 \text{ kJ/kg}$$

$$H_1 \sim 207,5 \text{ kJ/kg}$$

Exercice 4

Un concentré de lactosérum ayant un extrait sec total (EST) = 570 g/kg ; débit (m_C) = 6,3 t/h est séché par atomisation pour obtenir une poudre à 3 % d'humidité. L'air de séchage entre dans la tour à 180 °C ($H_a = 5$ g d'eau/kg d'air sec) et en sort à 12 % d'HR.



Question

Quel est le débit de poudre ?

Solution

En supposant le régime stationnaire et en négligeant les pertes de matière :

quantité d'EST qui entre = quantité d'EST qui sort

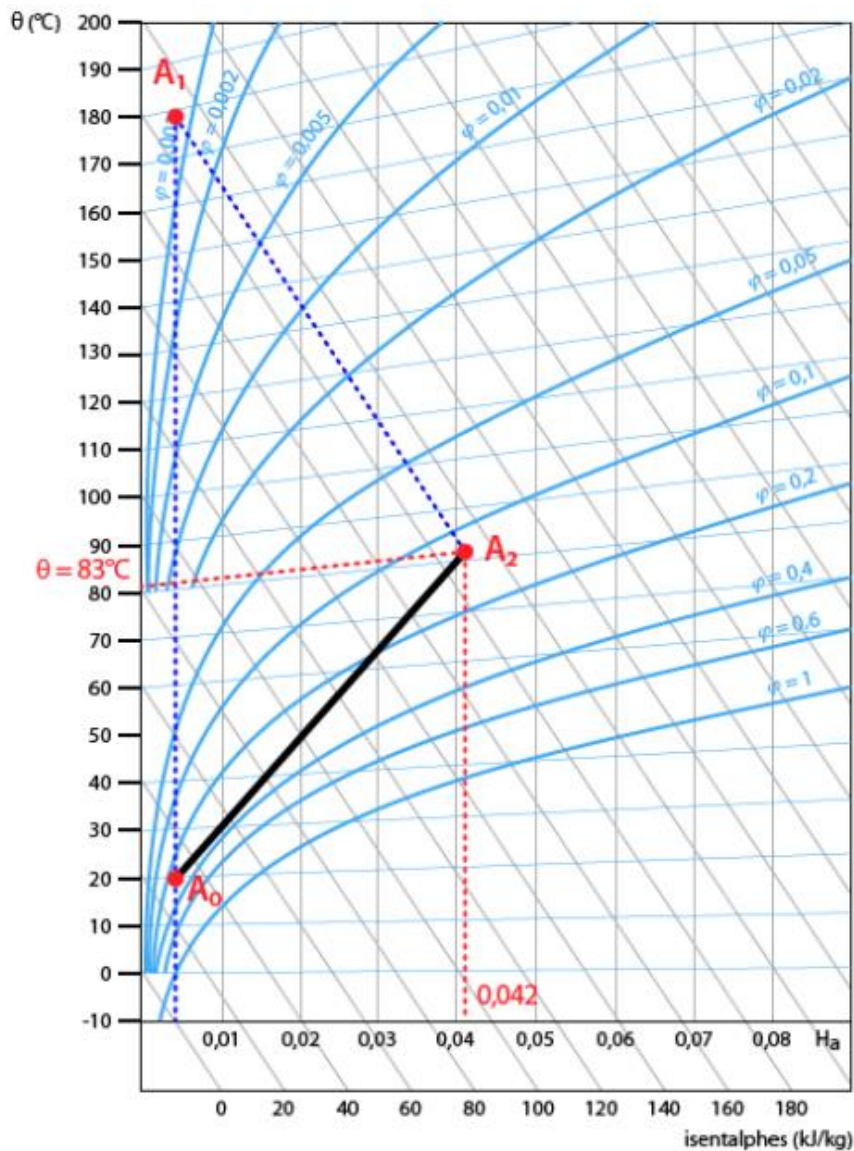
$$D'où $6300 \times 0,57 = 0,97 \times \dot{m}_p \implies \dot{m}_p = (6300 \times 0,57) / 0,97 = 3702 \text{ kg/h}$$$

Question

Quelle est la température de l'air à la sortie de la tour ?

Solution

D'après le diagramme enthalpique de l'air humide, la température de sortie de l'air est de ~ 83 °C, correspondant à une H_a de $\sim 0,042$ g/kg d'air sec.



Question

- a) Quelle est la valeur de l' H_a de l'air à la sortie de la tour ?
- b) Quel est le débit horaire d'air de séchage ?

Solution

Débit d'eau évaporé $m_e = 6300 - 3702 = 2598 \text{ kg/h}$

D'après le diagramme enthalpique de l'air, 1 kg d'air sec emporte :

$0,042 - 0,005 = 0,037 \text{ kg d'eau}$

1 kg d'air sec $\xrightarrow{\text{emporte}}$ 0,037 kg d'eau

? \leftarrow 2598 kg d'eau ?

d'où la quantité d'air sec nécessaire pour évaporer 2598 kg d'eau :

$$2598 \times 1/0,037 = 70216 \text{ kg d'air sec}$$

Par ailleurs, 1 kg d'air sec contient 5 g/kg d'humidité (d'après l'énoncé)

1 kg d'air sec $\xrightarrow{\text{contient}}$ 0,005 kg d'eau

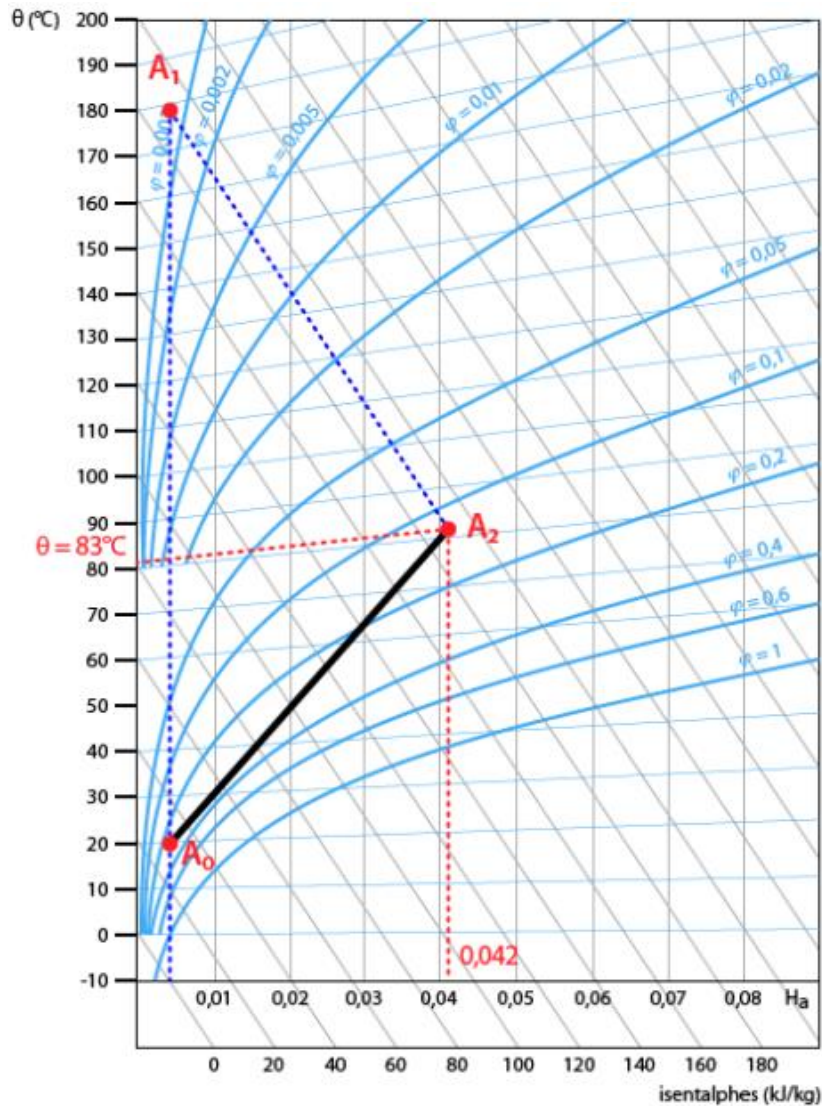
Ce qui veut dire que 1 kg d'air sec contient 1,005 kg d'air normal

$$1 \text{ kg d'air sec} \rightarrow 1,005 \text{ kg d'air normal}$$

$$70216 \text{ kg d'air sec} \rightarrow ?$$

D'où la quantité d'air nécessaire en kg :

$$70216 \times 1,005/1 = 70567$$



Question

Déterminer les valeurs de la CEM et le RCE, sachant que la température et l' H_a de l'air prélevé à l'extérieur sont respectivement égales à 20 °C et 5 g/kg d'air sec ; température moyenne du produit est de 60 °C

Solution

$$H_0 \approx 32 \text{ kJ/kg}; H_2 \approx 195 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{a0} = 0,005 \text{ kg d'eau/kg AS}; H_{a2} = 0,042 \text{ kg d'eau/kg AS}$$

1 kg d'air sec coûte 163 kJ (195-32) et emporte 0,037 kg d'eau (0,042-0,005)

$$163 \rightarrow 0,037$$

$$? \rightarrow 1$$

$$\text{CEM} = 163/0,037 = 4405 \text{ kJ/ kg d'eau évaporée}$$

$$\text{RCE} = \text{CEM}/\Delta H_v$$

La température moyenne du produit est de 60 °C, son énergie latente de vaporisation est de ~ 2358 kJ/kg

$$\text{D'où RCE} = 4571/2358 = 1,8 \approx 2$$

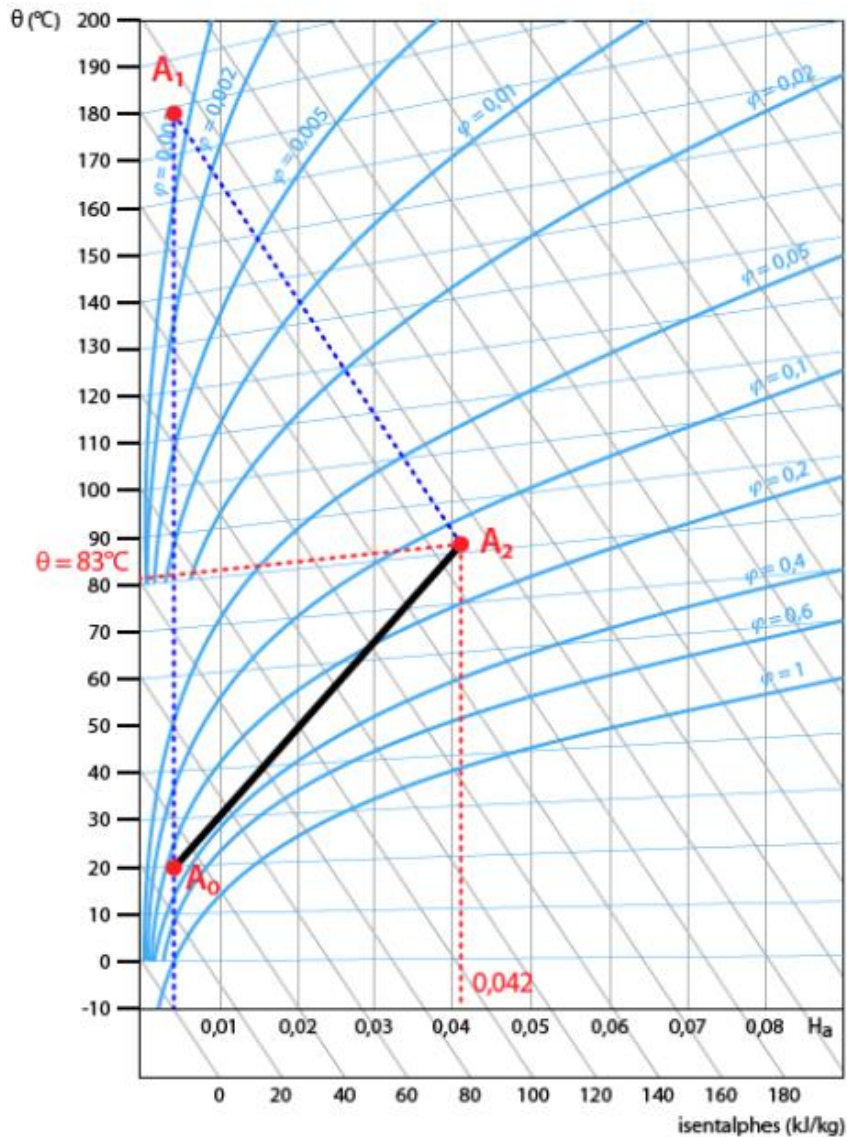
On dépense donc le double de l'énergie nécessaire

Question

L'air extérieur est à une température de 20 °C et une H_a de 5 g/kg d'air sec. Y a-t-il condensation à la sortie de la cheminée ?

Solution

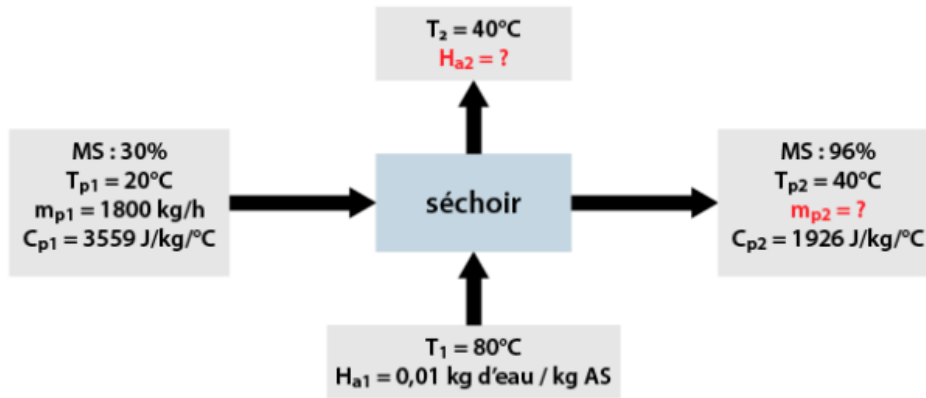
Le mélange de l'air de séchage (A_2) et de l'air extérieur (A_0) est un air qui se situant sur la droite $[A_0, A_2]$. Cette droite ne coupant pas la courbe de saturation ($\phi = 1$); il ne peut ainsi avoir condensation à la sortie de la cheminée de la tour.



Exercice 5

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 $T_1 = 80$ °C et $H_a = 0,01$ kg 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.

Les chaleurs massiques des levures de boulangerie à l'entrée et à la sortie sont respectivement de 3559 J/kg/°C et 1926 J/kg/°C.



Question

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 séchoir.

Solution

En supposant le régime stationnaire et en négligeant les pertes de matière :

Quantité d'EST qui entre = quantité d'EST qui sort

D'où $1800 \times 0,3 = 0,96 \times m_{p2} \rightarrow \dot{m}_{p2} = 562,5 \text{ kg/h}$

À l'aide du diagramme enthalpique de l'air humide, $H_{a2} = 0,026 \text{ kg d'eau / kg d'AS}$

En appliquant le bilan matière : $\dot{m}_a (H_{a2} - H_{a1}) = \dot{m}_{pMS}(X_1 - X_2)$

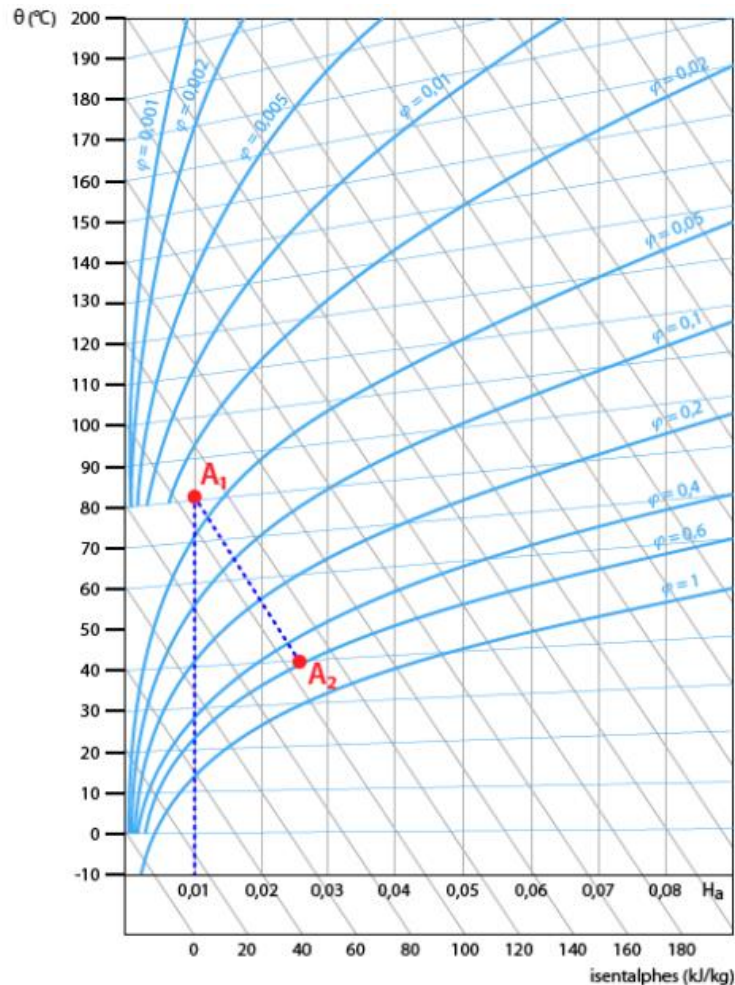
Avec $\dot{m}_{pMS} = 1800 \times 0,3 = 540 \text{ kg/h}$

$X_1 = 70/30 = 2,333 \text{ kg d'eau/kg ms}$

$X_2 = 4/96 = 0,04167 \text{ kg d'eau/kg ms}$

D'où :

$$\dot{m}_a = 540 \times (2,333 - 0,04167) / (0,026 - 0,01) = 77332 \text{ kg d'air/h}$$



Annexe A

Activité de l'eau dans certains produits

Valeur de a_w	Germes inhibés à la limite inférieure de chaque intervalle	Exemples d'aliments se situant dans l'intervalle correspondant de a_w .
1,00-0,95	Bacilles gram - spores bactériennes ; quelques levures.	Aliments contenant 40 % (en poids) de saccharose ; ou 7 % de sel, par ex., diverses saucisses cuites ; miettes de pain.
0,95-0,91	La plupart des coques ; lactobacille, forme végétatives de <i>Bacillaceae</i> ; quelques moisissures.	Aliments à 5 % de saccharose, ou à 12 % du NaCl, par ex., jambon cru sec, fromage type Hollande, mi-vieux.
0,91-0,87	La plupart des levures	Aliments à 65 % de saccharose c'est-à-dire à saturation) ; ou à 15 % de NaCl par ex., saucisson sec ; fromage type Hollande vieux.
0,87-0,80	La plupart des moisissures ; <i>Staph. aureus</i>	Farine, riz, légumes sec, etc., renfermant 15 à 17 % d'humidité ; "cake", lait concentré sucré ($a_w = 0,83$ env.)
0,80-0,75	La plupart des bactéries halophiles	Aliments à 26 % de NaCl (c'est-à-dire à saturation) ; pâte d'amandes, renfermant 15 à 17 % d'humidité, confitures et marmelades.
0,75-0,65	Moisissures xérophiles	Flacons d'avoines, renfermant env. 10 % d'humidité.
0,65-0,60	Levures osmophiles	Fruits désydratés, renfermant 15 à 20 % d'humidité ; caramels mous et bonbons renfermant env. 8 % d'humidité
0,50		Pâtes alimentaires, avec env. 12 % d'humidité ; épices, avec env. 10 % d'humidité.
0,40		Oeufs entiers en poudre, avec env. 5 % H_2O
0,30		Biscuits, chapelure, croûte de pain, etc., avec 3 à 5 % d'humidité.
0,20		Lait entier en poudre, 2-3 % H_2O , légumes désydratés avec 5 % H_2O Flacons de maïs avec 5 % H_2O .

Diagramme de l'air humide de « Mollier-Ramzine »

