

COURS DE SECHAGE

Introduction

Le séchage est l'une des plus principales opérations de conservation de nombreux produits alimentaires. Il constitue souvent la dernière opération (après généralement l'opération d'évaporation) du procédé de fabrication d'un produit. C'est une opération de séparation thermique qui consiste à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant un corps dit « humide » par vaporisation de ce solvant. Le produit final est un solide qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle.

Le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie alimentaire est le séchage par entraînement : la température reste inférieure à celle d'ébullition de l'eau et le gaz d'entraînement est généralement de l'air. C'est l'air qui cède sa chaleur au produit et reçoit l'humidité extraite de celui-ci. **Le séchage est alors défini comme étant un double transfert de chaleur et de masse.**

La compréhension des phénomènes mis en jeu lors du séchage des produits alimentaires se base principalement sur : (i) les équilibres air-produit ; et (ii) les cinétiques de séchage et de transformation du produit.

Ce chapitre fait suite au chapitre précédent relatif à l'évaporation et s'attache à présenter dans un premier temps les principes physiques du séchage ; en se basant sur ceux-ci, la construction et les propriétés du diagramme enthalpique de l'air humide seront étudiées. Par la suite, nous aborderons succinctement quelques notions de bilan sur les séchoirs. Nous terminerons en présentant les principaux types de séchoir appliqués dans l'industrie agroalimentaire ainsi que la qualité des produits séchés.

Humidité relative d'équilibre et activité de l'eau

L'eau dans les aliments présente différentes propriétés physicochimiques selon ses états de liaison avec les macromolécules de l'aliment et avec les molécules d'eau entre elles.

Définition:L'eau libre

C'est l'eau retenue par effet capillaire dans les pores des aliments, l'eau liée par effet osmotique, l'eau d'hydratation des macromolécules et l'eau solvante.

L'eau libre est mobile et conserve toutes les propriétés de l'eau pure.

Définition:L'eau liée

Elle forme une couche monomoléculaire étroitement associée par divers types de liaisons aux protéines et aux glucides. Cette eau est fixe et elle possède la particularité de s'échapper à la congélation car les interactions eau-macromolécules sont plus fortes que celles des molécules d'eau cristallisées entre elles. Cette eau n'est pas disponible.

La notion de disponibilité de l'eau dans un aliment peut être définie aux moyens de :

- L'Humidité Relative d'Equilibre (HRE)

$$\text{HRE} = \frac{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à la température } \theta}{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau saturante à la température } \theta} \times 100$$

$$\text{HRE} = \frac{P_w}{P_{w0}} \times 100 \quad (1)$$

- L'activité de l'eau

$$A_w = \frac{P_w}{P_{w0}} = \frac{\text{HRE}}{100} \quad (2)$$

L' a_w est comprise entre 0 et 1 ; elle est d'autant plus faible que les forces de liaisons sont intenses et tend au contraire vers l'unité lorsque l'eau se rapproche de l'état libre. Elle permet, en outre, de prévoir et d'éviter les détériorations physicochimiques, les activités enzymatiques et la prolifération des micro-organismes. En ce qui concerne ces derniers, les bactéries, les levures et les moisissures ne peuvent se développer qu'à des a_w supérieures respectivement à 0,91, 0,88 et 0,80. Le **Tableau 1** (voir pdf) représente les valeurs d'activités de quelques produits alimentaires.

Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau

L' a_w dans un produit alimentaire dépend principalement de sa teneur en eau (X) et de sa température θ . La courbe représentant, pour une température θ donnée, la X d'un produit en fonction de la valeur de l' a_w ou de l'HRE est appelée :

- **Isotherme d'adsorption**, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- **Isotherme de désorption**, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

On peut représenter graphiquement la courbe appelée isotherme d'adsorption-désorption, obtenue en portant :

En abscisse : soit l' a_w , soit l'HRE

En ordonnée : la teneur en eau du produit exprimée en g d'eau pour 100 g de matière sèche (% MS)

Les deux courbes sont en général différentes (**Figure 1**) car le séchage d'un produit (passage d' $a_w = 1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité irréversibles.

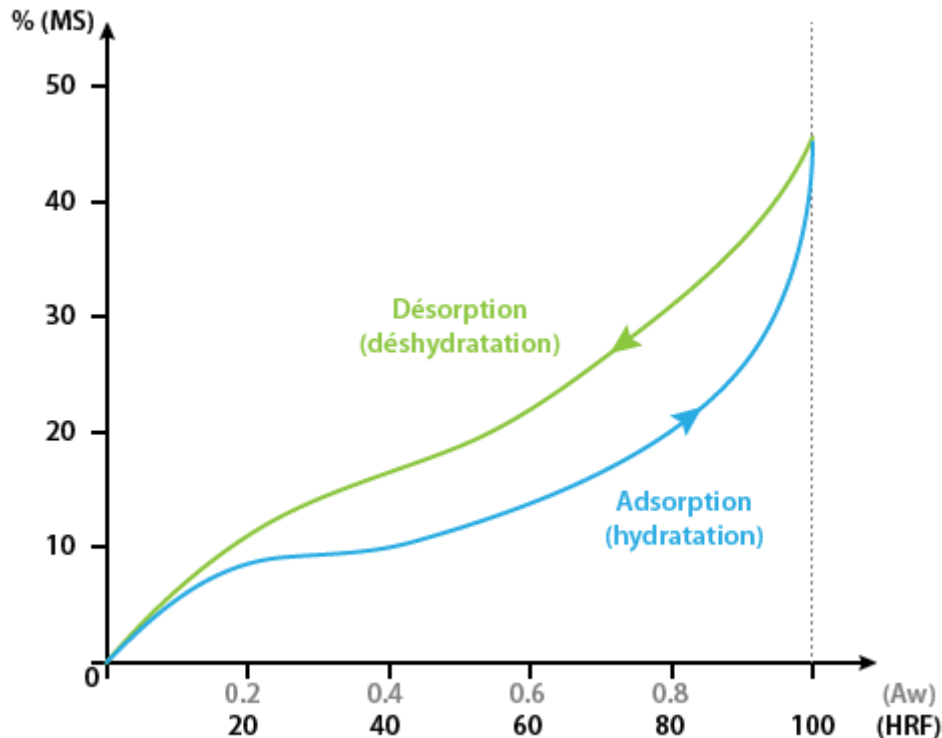


Figure 1 : Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau

En séchage, on s'intéresse particulièrement à la courbe de désorption qui peut être divisée en 3 zones (**Figure 1**) :

- Zone 1 ($0 < a_w < 0,2$) : Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit (forces de Van der Waals entre groupements hydrophiles et molécules d'eau). L'adsorption se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant la surface externe et les pores du produit. L'eau est dans un état lié (rigidité, fortes liaisons hydrogènes). Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.
- Zone 2 ($0,2 < a_w < 0,6$) : Adsorption des molécules d'hydrogène sur la monocouche initiale, ou inclusion de molécules d'eau par capillarité. L'isotherme est linéaire dans cette zone. Il s'agit d'un état intermédiaire entre solide et liquide.
- Zone 3 ($a_w > 0,6$) : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro-capillaire constitue une phase continue.

L'analyse de l'isotherme d'adsorption et de désorption montre que les 2 courbes ne sont pas superposées. Pour une teneur en eau donnée, l'équilibre de la désorption s'établit pour des a_w plus faibles que l'équilibre de l'adsorption. C'est le **phénomène d'hystérésis**, qui ne se manifeste que pour des valeurs d' $a_w > 0,2$. L'hystérésis s'explique par deux observations :

- Les pores des aliments sont en général plus petits en surface qu'en profondeur. La pression de vapeur d'eau nécessaire au remplissage est plus élevée que celle à laquelle les pores se vident ;

- L'hystérésis est surtout marquée dans les fruits et les légumes car les sucres de ces aliments forment des solutions sursaturées qui ne précipitent pas lors de la déshydratation.

Intérêt des isothermes d'adsorption en technologie alimentaire

- Du point de vue thermodynamique, les isothermes d'adsorption fournissent des informations sur les enthalpies de "sorption" et sur le type de liaison de l'eau avec la matière sèche du produit ;
- Du point de vue structurel, elles permettent de mieux comprendre le rôle de la taille des particules, de l'état amorphe, et de la surface spécifique dans les phénomènes de désorption ou adsorption de la vapeur d'eau ;
- Du point de vue technologique, elles sont utiles à la prédiction de la durée de conservation des aliments, au contrôle du séchage et à la prévention de certains accidents **comme le collage ou la prise en masse des produits alimentaires pulvérulents**. C'est la composition relative en protéines, amidons, sels minéraux et saccharose qui détermine les isothermes d'adsorption. L'objectif étant d'atteindre des a_w faibles ; pour cela, on peut faire appel à divers additifs comme le sel, le saccharose pour abaisser l' a_w sans changer la teneur en eau. Ces additifs sont précieux pour les aliments à humidité moyenne $< 35\%$ et $0,6 < a_w < 0,8$. Ils sont stables plusieurs semaines en emballage étanche (saucissons secs, fruits secs, biscuits,...).

Par ailleurs, l'état d'un composé influence sur le taux de fixation de l'eau ; par exemple, à humidité donnée, le saccharose amorphe retient plus d'eau que le saccharose cristallisé car la transition d'un état à l'autre provoque une expulsion d'eau à mesure que le cristal s'ordonne. Cette transformation est liée à la fois à l'humidité et à la température. Lors de la cristallisation, l'eau libérée dissout les cristaux des couches externes, alors que les couches internes consolident leur cristallisation et se prennent en masse. L'eau expulsée du cristal peut aussi se re-localiser sur d'autres constituants et donne une masse collante. On peut citer les exemples suivants :

- Le café soluble déshydraté prend en masse en vieillissant (surtout lorsque l'emballage n'est plus étanche) ;
- Le lait en poudre subit la même transformation ;
- Les bonbons deviennent collants à l'extérieur (les cristaux passent à l'état amorphe) et durs à l'intérieur par cristallisation et expulsion d'eau vers l'extérieur.

Plus l' a_w dans un aliment est faible, mieux il se conserve, car la prolifération microbienne et les réactions chimiques sont limitées (**Figure 2**). Les courbes des isothermes sont utiles pour prévoir le comportement des aliments suite aux traitements technologiques et aux conditions de stockage.

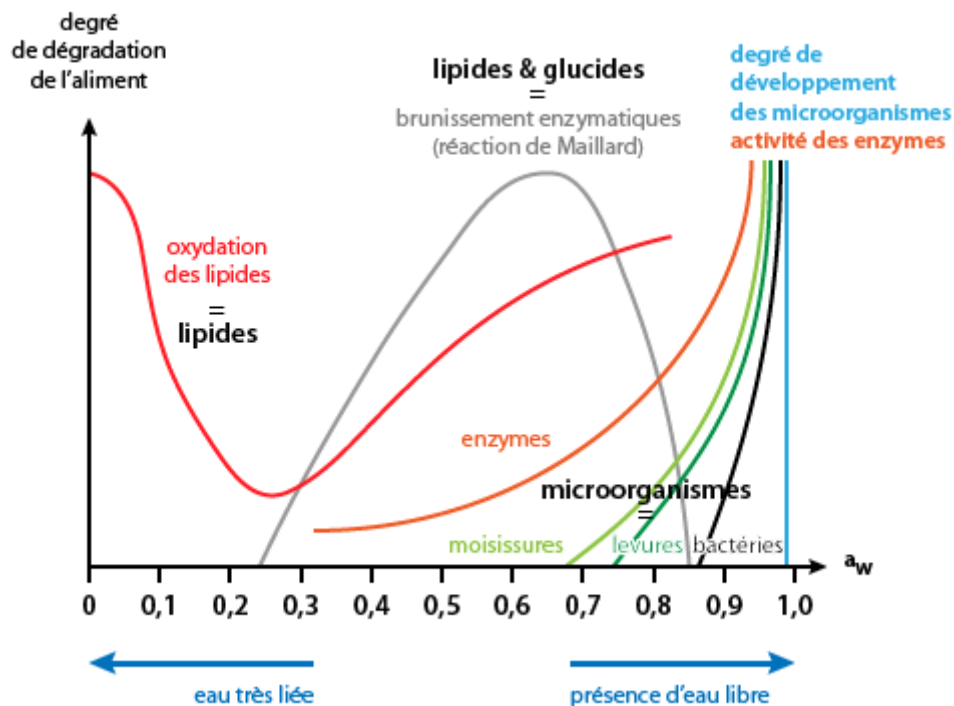


Figure 2 : Risque de détérioration des aliments en fonction de l' a_w

L'air humide

Le diagramme enthalpique de l'air humide est un instrument pratique et efficace pour : (i) étudier et évaluer l'énergie nécessaire à la maîtrise des conditions du séchage ; et (ii) la mise en œuvre correcte du processus industriel. Le diagramme permet de déterminer toutes les propriétés de l'air telles que la température de rosée (θ_r), température du thermomètre humide (θ_h), enthalpie (H), HR, etc. et ce à partir de ses deux paramètres comme, par exemple, la température et l'humidité absolue (H_a). Le diagramme permet aussi de suivre l'évolution de ces paramètres au cours de l'opération du séchage sans avoir recours à des calculs fastidieux.

Construction du diagramme enthalpique de l'air humide

En séchage, la représentation la plus utilisée est le diagramme de Mollier-Ramzine, sur lequel l'enthalpie H (exprimée en kJ/kg d'air sec) est portée en ordonnées et le taux d'humidité absolue H_a (exprimé en kg d'eau/kg d'air sec) en abscisses. Les températures apparaissent sous la forme d'isothermes. Les axes sont obliques et l'inclinaison de l'axe des abscisses est choisie de manière à ce que l'isotherme à 0°C soit perpendiculaire à l'axe des ordonnées. L'humidité relative apparaît sur des courbes iso-humidité relative (**Figure 3**). Les caractéristiques thermodynamiques de l'air humide à pression atmosphérique sont établies en considérant 1 kg d'air sec contenant H_a kg d'eau.

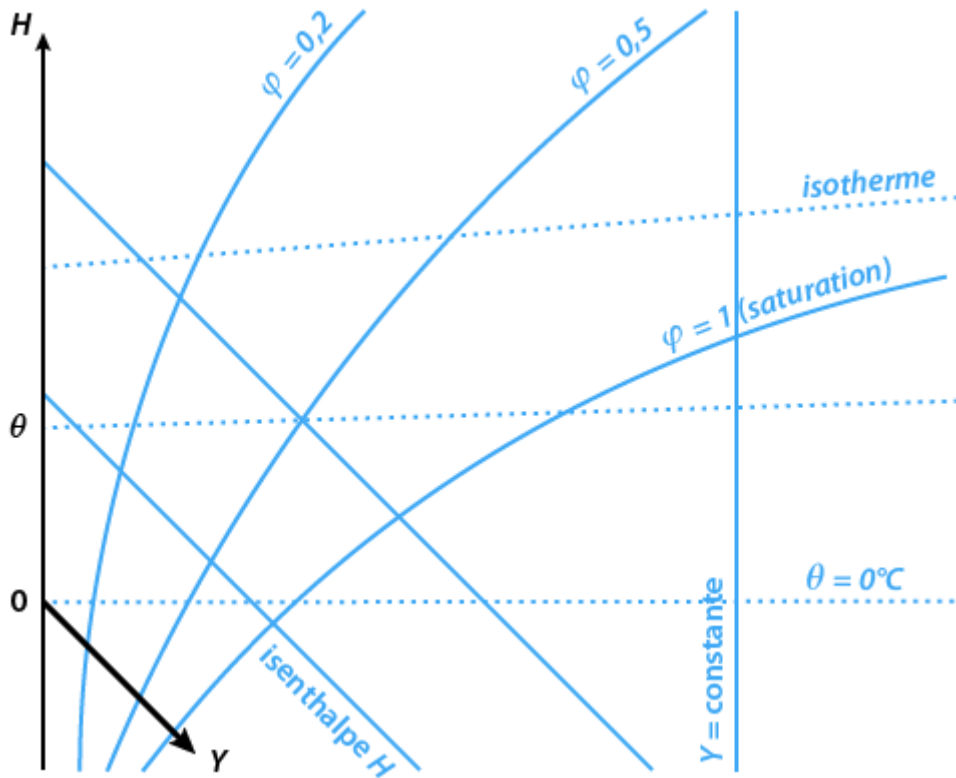


Figure 3 : Représentation schématique du diagramme de Mollier-Ramzine

L'enthalpie de l'air humide est la somme de l'enthalpie de l'air sec et de la vapeur d'eau.

- $H = H_{airsec} + H_{vapeur}$
- $H = C_{pa}\theta + H_a(\Delta H_{v0}) + C_{pv}\theta$ avec $H_{airsec} = C_{pa}\theta$
et $H_{vapeur} = H_a(\Delta H_{v0}) + C_{pv}\theta$ (3)

Où :

$C_{pa}\theta$: Enthalpie nécessaire pour faire passer l'air sec de 0°C à θ (chaleur sensible)

$H_a C_{pv}\theta$: Enthalpie nécessaire pour faire passer la vapeur d'eau de 0°C à θ (chaleur sensible)

$H_a \Delta H_{v0}$: enthalpie de vaporisation de l'eau (chaleur latente) à 0°C

Dans la gamme des températures et des pressions atmosphériques ordinaires, l'équation (3) s'écrit :

$$H \approx 1,01\theta + H_a(2494 + 1,92\theta)$$

$$H \approx \underbrace{2494H_a}_{H'} + \underbrace{\theta(1,01 + 1,92H_a)}_{H''} \quad (4)$$

Ainsi, H' : Chaleur latente H'' : Chaleur sensible

Grandeurs mesurables

Définition: Humidité absolue

L'humidité absolue (H_a) ou teneur en vapeur d'eau s'obtient à partir de

$$H_a = \frac{m_e}{m_a} \quad (5)$$

l'équation :

Où m_e est la quantité d'eau, et m_a la quantité d'air sec.

H_a est généralement exprimée en kg d'eau/kg d'air sec.

Définition: Température de rosée

La température de rosée (θ_r) d'un air humide est définie comme étant la température pour laquelle la pression de vapeur p est égale à la pression de vapeur saturante (**Figure 4**). On la mesure comme étant la température à laquelle, il faut refroidir l'air humide (à H_a constante) pour atteindre la saturation. Elle est déterminée à l'aide d'un hygromètre à condensation.

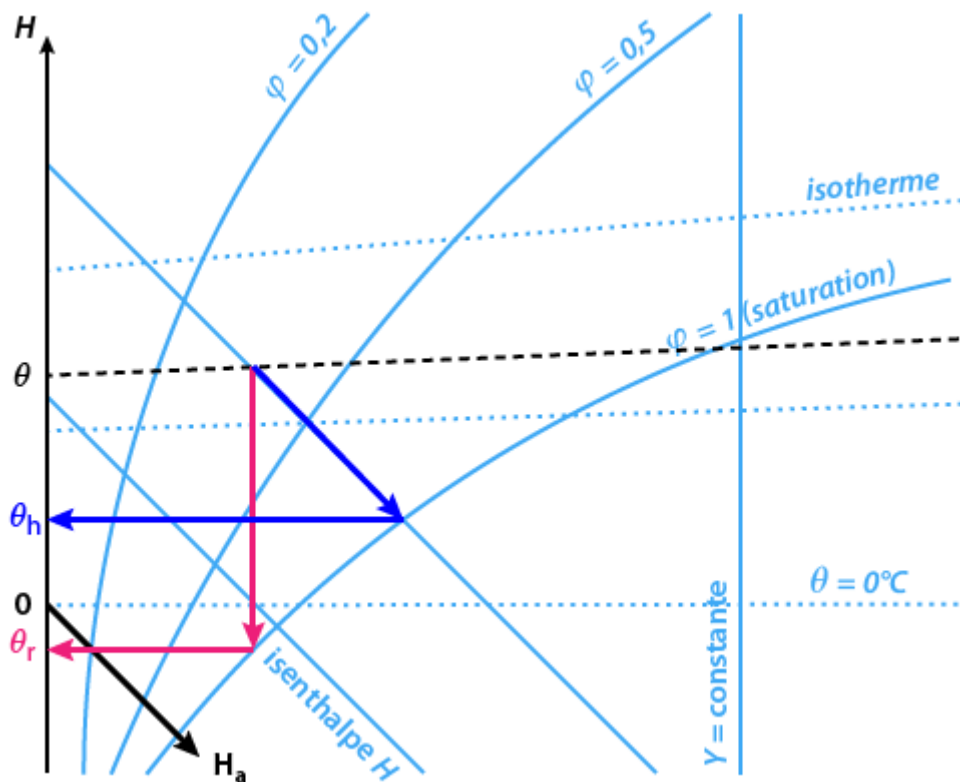


Figure 4 : Déterminations de la température de rosée et de la température du thermomètre humide

Définition: Température du thermomètre humide

La température du thermomètre humide (θ_h) est définie comme la température à l'équilibre de l'air humide amené à saturation (formation des premières gouttes d'eau liquide) par augmentation de H_a (**Figure 4**). Elle est déterminée à l'aide d'un psychromètre. En pratique, c'est la température donnée par le thermomètre humide dont le bulbe est enveloppé dans un matériau poreux imprégné d'eau ; l'air humide est amené à une vitesse suffisante autour de celui-ci pour atteindre un équilibre définissant la θ_h .

La θ_h se lit à l'intersection de la droite isenthalpe passant par (θ, H_a) de l'air avec la courbe HR = 100%

Définition: Humidité relative (HR)

HR est une mesure relative du degré de saturation en vapeur d'eau de l'air. Les capteurs les plus utilisés pour la détermination de l'HR sont les hygromètres à variation d'impédance. L'élément sensible est une couche mince d'un produit hygroscopique dont la résistivité ou la constante diélectrique varie beaucoup avec HR de l'air dans lequel il est placé.

Mélanges d'air

À l'aide du diagramme enthalpique de l'air humide, il est possible de déterminer les caractéristiques d'un mélange de deux airs de caractéristiques connues (**Tableau 2**).

L'humidité absolue H_{am} et l'enthalpie h_m du mélange M sont telles que :

$$\begin{cases} m_1 \cdot H_{a1} + m_2 \cdot H_{a2} = (m_1 + m_2) \cdot H_{am} \\ m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2 = (m_1 + m_2) \cdot h_m \end{cases} \quad (6)$$

il en découle :

$$\begin{cases} m_1 \cdot (H_{am} - H_{a1}) = m_2 \cdot (H_{a2} - H_{am}) \\ m_1 \cdot (h_m - h_1) = m_2 \cdot (h_2 - h_m) \end{cases} \quad (7)$$

soit : $\frac{m_1}{m_2} = \frac{H_{a2} - H_{am}}{H_{am} - H_{a1}} = \frac{h_2 - h_m}{h_m - h_1}$ (8)

Remarque:

L'égalité des rapports de l'équation (8) se traduit par l'alignement des points 1, 2 et m sur le diagramme enthalpique de l'air humide.

Tableau 2 : caractéristiques des airs 1 et 2 et de leur mélange

	Masse (Kg d'air sec)	Enthalpie (KJ Kg)	Humidité absolue (Kg d'eau / Kg d'air sec)
Air 1	m_1	h_1	H_{a1}
Air 2	m_2	h_2	H_{a2}
Mélange M	$m_1 + m_2$	h_m	H_{am}

Utilisation du diagramme de l'air humide en séchage

Le séchage peut être effectué à des pressions autres que la pression atmosphérique. La construction du diagramme enthalpique est sensiblement le même, à l'exception du tracé des courbes d'humidité relative qui dépend de la pression totale.

Pour pouvoir utiliser le diagramme de Mollier-Ramzine, on utilise les courbes (i/p_r) au lieu de HR où

$$i = \frac{\text{Pression saturante de vapeur d'eau à } \theta \text{ de l'air}}{\text{Pression totale de vapeur d'eau dans l'atmosphère}} = \frac{P_s}{P_t}$$

où P_r est égale au rapport de la pression totale à laquelle on travaille à la pression

atmosphérique ordinaire : $P_r = \frac{P_t}{P_{atm}}$

Ceci explique qu'un air saturé à pression atmosphérique : (i) comprimé de façon isotherme, devient un brouillard puisqu'il passe sous sa courbe de saturation ; et (ii) détendu de la même façon se dé-sature puisqu'il passe au dessus de sa courbe de saturation.

Principes physiques du séchage

Pour évaporer l'eau d'un produit, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre : **l'ébullition et l'entraînement**.

Séchage par ébullition

Le séchage par ébullition consiste à transmettre au produit amené à sa température d'ébullition un flux thermique au travers une surface d'échange de chaleur latente. L'évaporation de l'eau est directement proportionnelle à l'apport d'énergie (chaleur latente de vaporisation). En pratique cet apport est effectué par conduction au travers de la surface d'échange au contact du produit par de la vapeur dont la température est comprise entre 130 et 150°C.

Selon la loi de Fourier, le transfert de chaleur s'effectue de façon proportionnelle à la différence de température entre le fluide caloporteur et le liquide en ébullition à la pression considérée.

Remarque:

La température d'ébullition dépend de la pression totale (elle est plus basse sous vide qu'à pression atmosphérique) et de l' a_w du produit (elle diminue lorsque l' a_w augmente).

Séchage par entraînement

Le séchage par entraînement 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 5**)

Le séchage par entraînement est le moyen de séchage le plus universel, tous produits et secteurs alimentaires confondus (lait, œuf, charcuterie, céréales et produits végétaux, fruits, etc...).

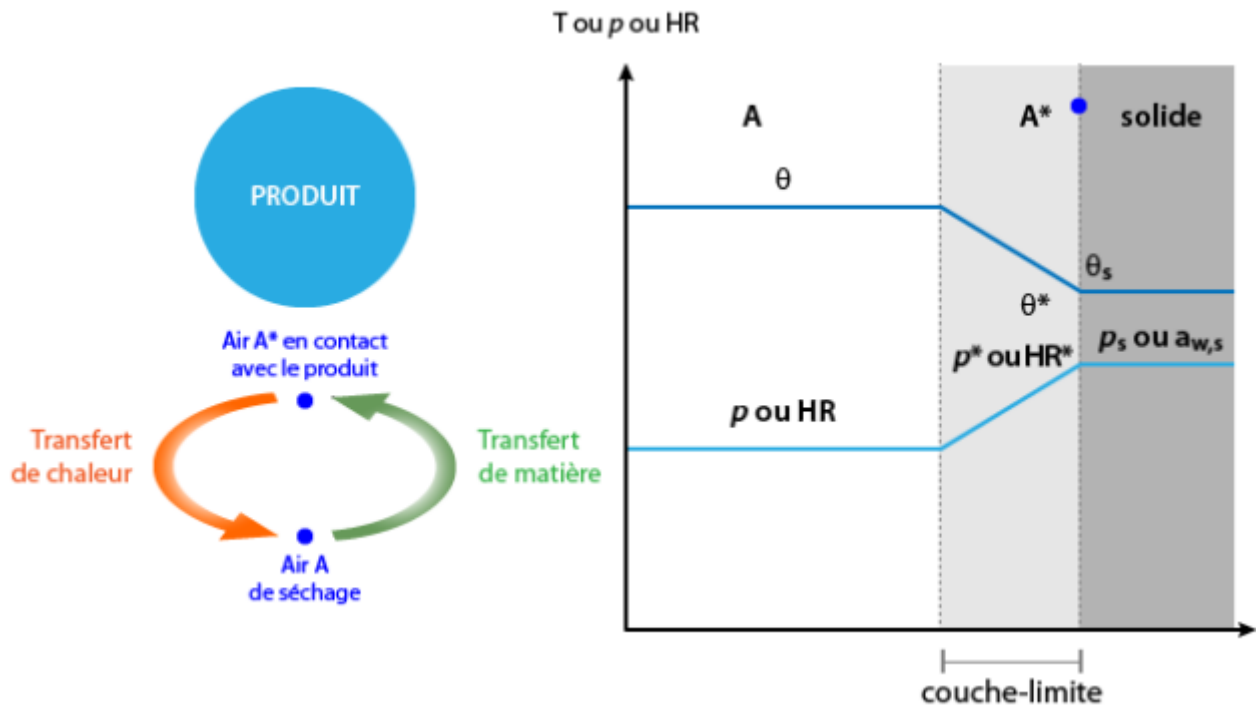


Figure 5 : Transfert entre l'air et la surface du produit

Phénomènes limitant

La vitesse à laquelle s'effectue le séchage est liée à l'allure des transferts internes et externes de matière et de chaleur. Ces transferts correspondent à des mécanismes que l'on peut considérer comme disposés en parallèle ou en série. Dans ce dernier cas, c'est le mécanisme le plus lent qui constitue l'étape limitante, et qui détermine la vitesse du procédé.

Cinétique du séchage

Les très grandes variabilités et diversités des produits alimentaires et biologiques laissent envisager que le meilleur moyen de caractériser le comportement d'un produit alimentaire au cours du séchage consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers.

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 ;

$$\frac{-dX}{dt}$$

- 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**) :

- 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).

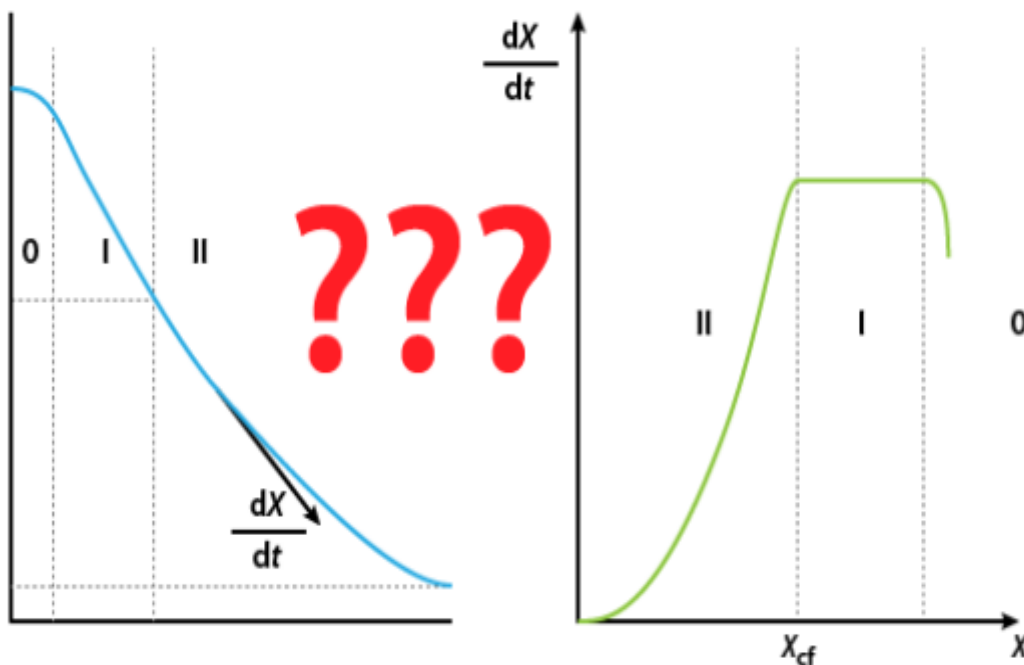


Figure 6 : Courbes théoriques caractérisant un séchage par entraînement

Bilan sur les séchoirs

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

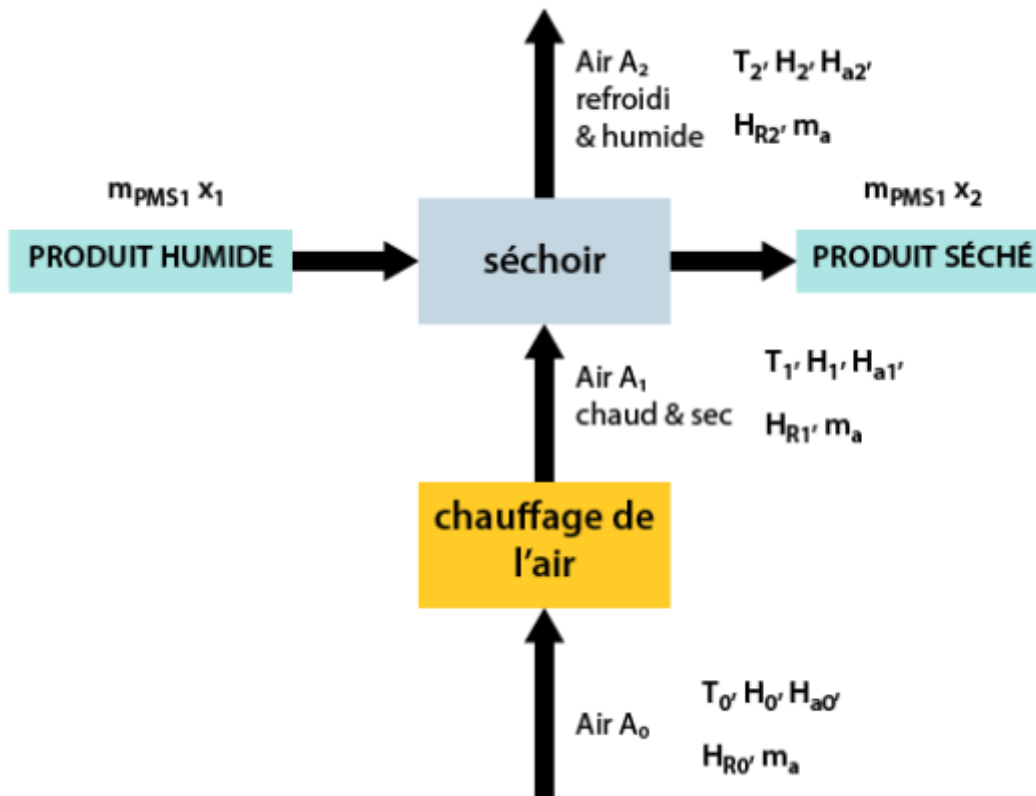


Figure 7 : Transfert entre l'air et la surface du produit

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 gagnée par l'air, le débit d'eau (m_e) = $\dot{m}_a (H_{a2} - H_{a1}) = \dot{m}_{pMS} (X_1 - X_2)$ (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 $\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H_v$ 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 : $\frac{\text{CEM}}{\Delta H_v(\theta)}$, avec $\Delta H_v(\theta)$ étant l'énergie latente de vaporisation de l'eau à la température moyenne (θ) du produit, pendant le séchage.

Ce rapport permet aussi de déterminer la masse de vapeur nécessaire pour vaporiser 1 kg d'eau, en prenant $\Delta H_v(\theta)$ 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
Evaporateurs 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.

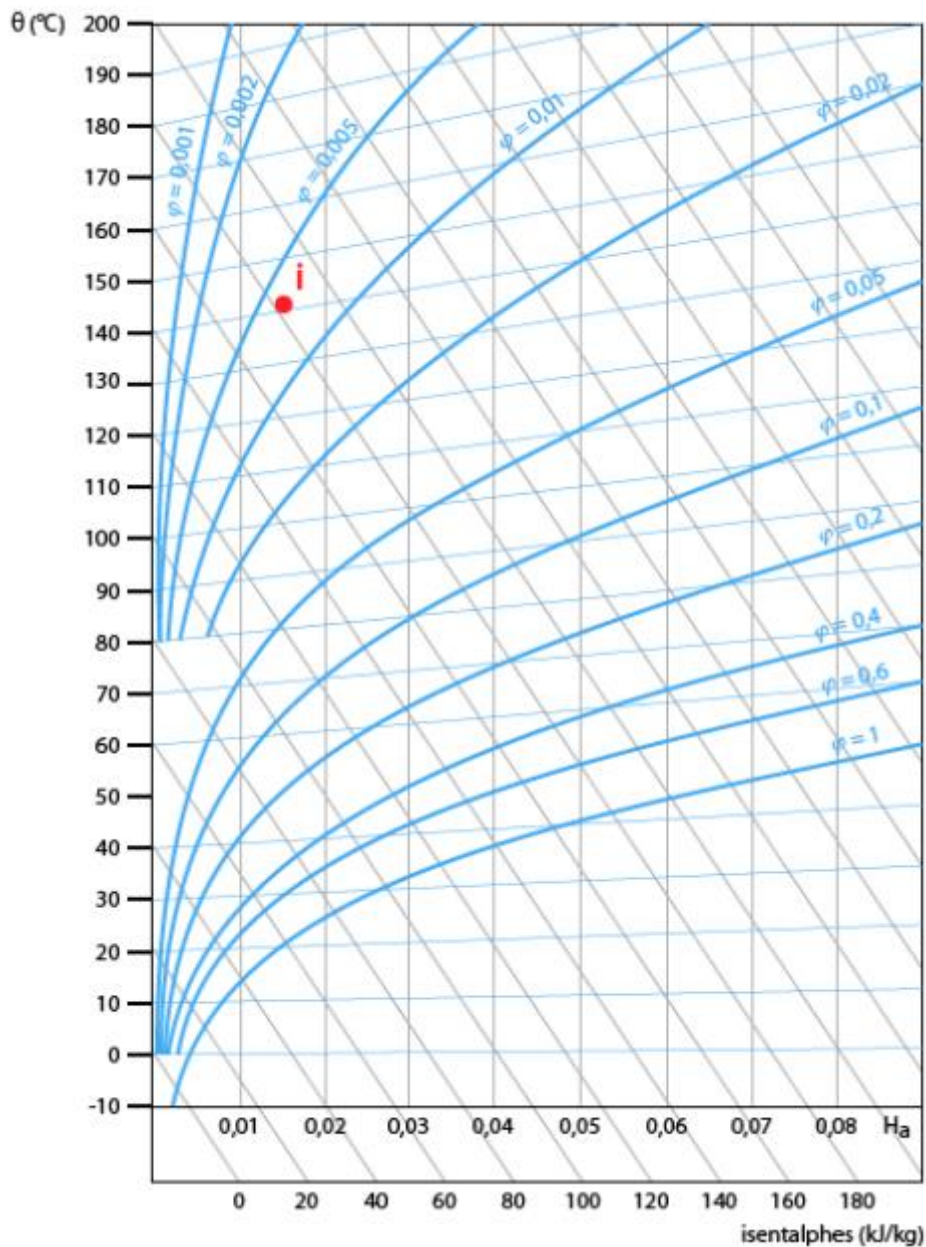
Il convient notamment dans le cas des légumes de les blanchir afin de détruire les enzymes. Dans le cas des produits laitiers, des soupes, ... une pasteurisation est souvent nécessaire pour la destruction des micro-organismes, puisque lors de la déshydratation, ces micro-organismes peuvent se développer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

Exercice 1

Question

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 (θ_h), température de rosée (θ_r) et son enthalpie (H).

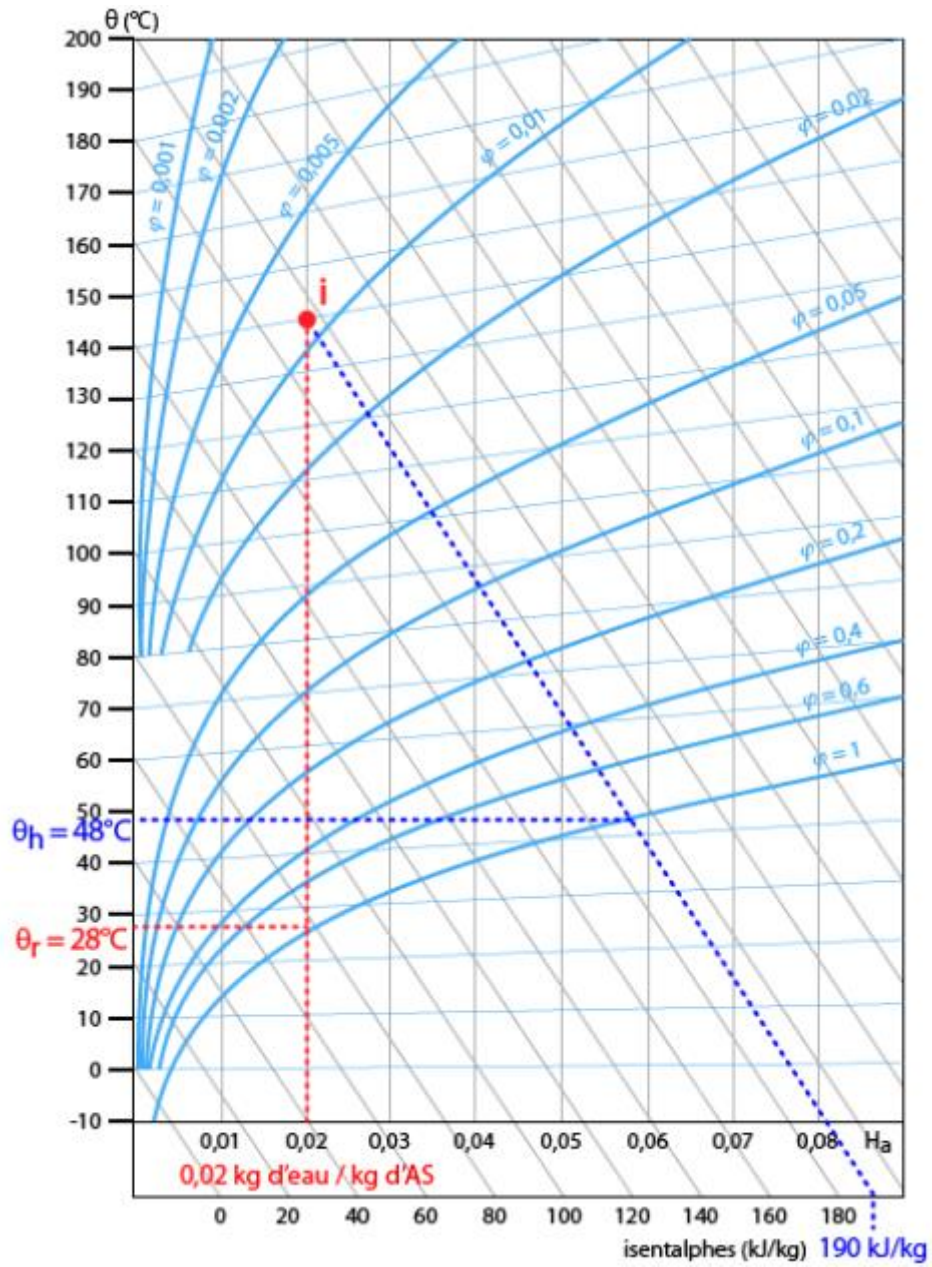


2

Solution

- $H_a = 0,02$ kg d'eau/kg d'air sec
- Enthalpie (H) = 190 kJ/kg

- Température du thermomètre humide (θ_h) = 48°C
- Température de rosée (θ_r) = 28°C



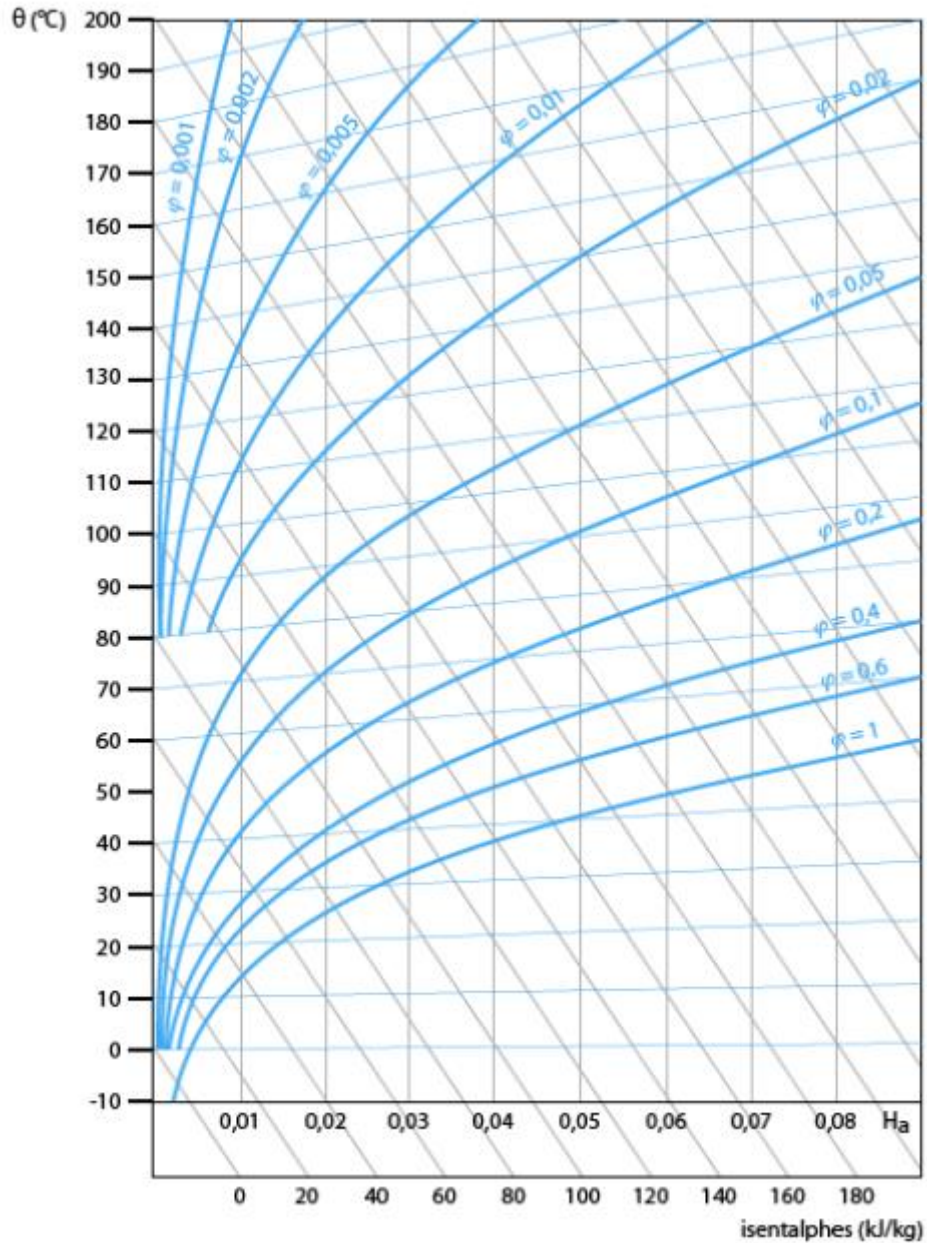
/

-

Exercice 2

Un air A_0 présente les caractéristiques suivantes : $T_0 = 28 \text{ °C}$, $H_{a0} = 0,01 \text{ kg d'eau / kg d'air sec}$.

L'air est chauffé (A_1) 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 2 : A_2).



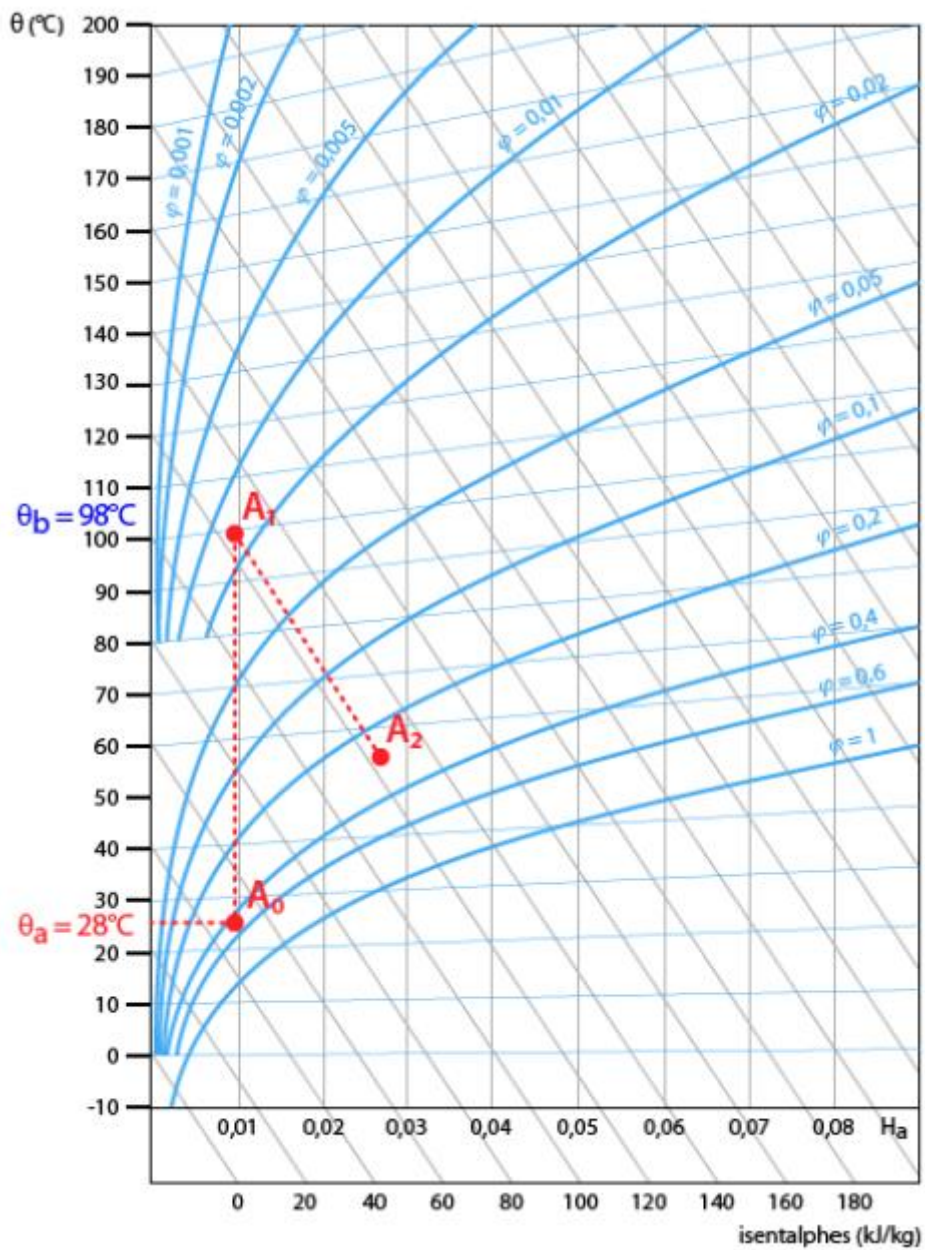
Question 1

Déterminer H_{a1} et H_{a2}

Question 2

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

Solution Q1.



3

Solution Q2

D'après le diagramme, 1 kg d'air sec contient 0,017 (0,027-0,01) kg de vapeur d'eau

Pour évaporer 1000 kg d'eau?

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

! \leftarrow ----- \rightarrow 1000 kg de vapeur d'eau

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

Remarque:

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

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

$$m_a = \frac{m_e}{(H_{a2} - H_{a1})} = \frac{1000}{0,027 - 0,01} = 58823 \text{ kg/h}$$

Exercice 3

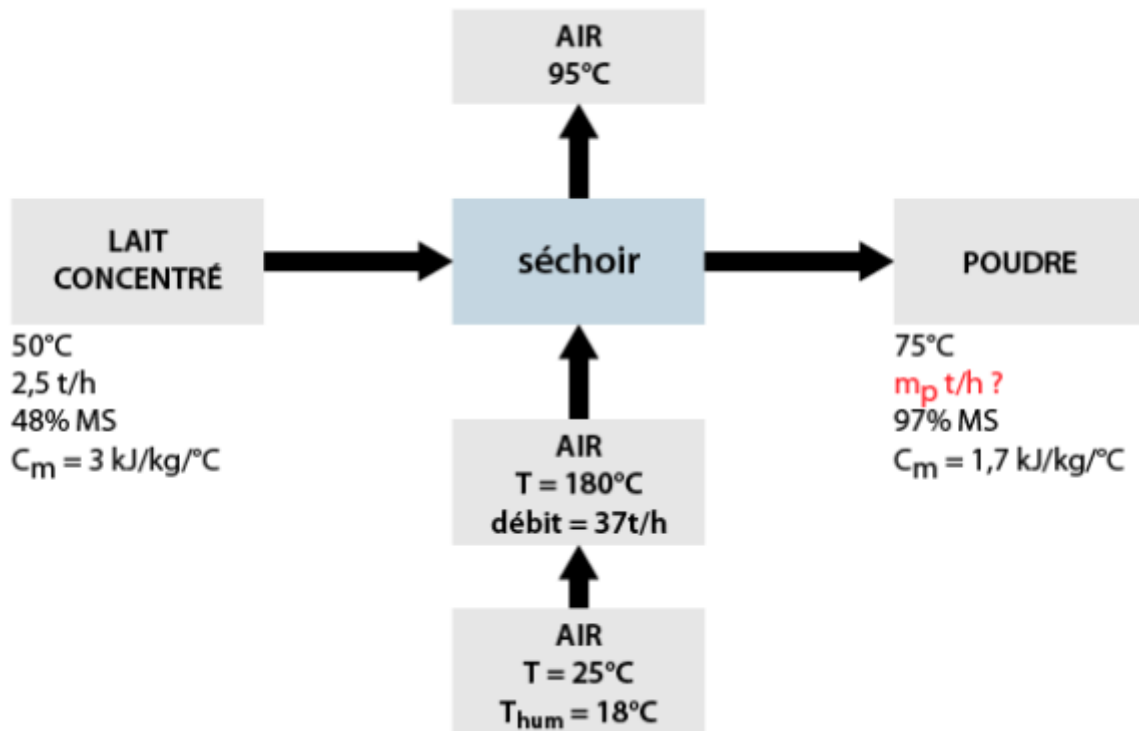
Une tour de séchage par pulvérisation traite 2,5 t/h de lait concentré à 48 % de matière sèche (MS), pour faire une poudre à 3 % d'humidité. Le produit entre à 50°C et sort à 75°C

L'air extérieur est à 25°C, avec une température de thermomètre humide (θ_h) de 18°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 1

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

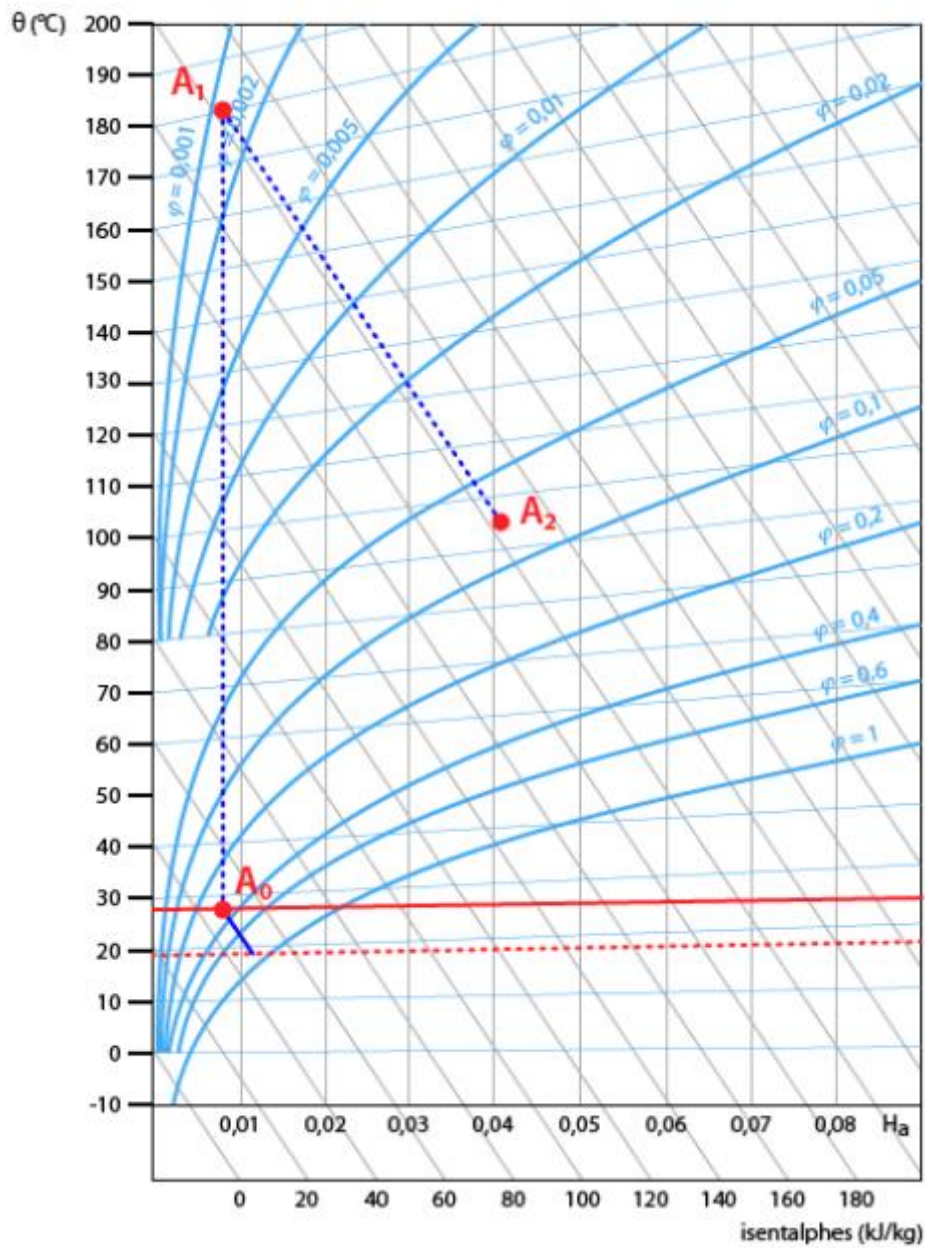


4

Question 2

Déterminer le bilan thermique ou énergétique

Solution Q1



5

Solution Q2

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

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

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot C_p \cdot \theta = (2500/3600) \times 3 \times 50 = 104,2 \text{ kW}$$

- Débit thermique de la poudre

$$\dot{Q}_p = (1237/3600) \times 1,7 \times 75 = 43,8 \text{ kW}$$

$$\Sigma \text{entrées} = 2158 + 104,2 = 2262,2 \text{ kW}$$

$$\Sigma \text{sorties} = 2158 + 43,8 = 2201,8 \text{ kW}$$

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 3

Quelle serait l'efficacité énergétique du séchoir ?

Solution Q3

$$H_0 = 50 \text{ kJ/kg}; H_2 = 210 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{a0} = 0,009 \text{ kg d'eau/kg AS}; H_{a2} = 0,044 \text{ kg d'eau/kg AS}$$

1 kg d'air sec coûte 160 kJ (210-50) et emporte 0,035 kg d'eau (0,044-0,009)

$$160 \rightarrow 0,035$$

$$? \leftarrow 1$$

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

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

La température moyenne du produit est de $62,5 \text{ }^\circ\text{C}$ $[(50 + 75)/2]$, son énergie latente de vaporisation est de $\sim 2353 \text{ kJ/kg}$ d'où :

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

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 :

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

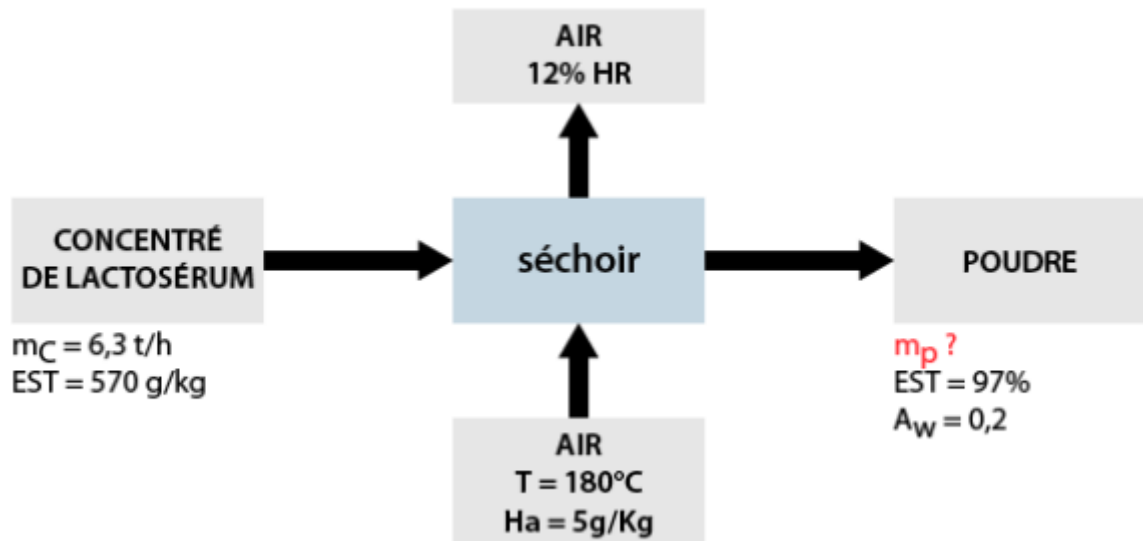
Avec $H_a \sim 0,009$; $\theta = 25$ pour H_0 et $\theta = 180$ pour H_1 ; ce qui donne :

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

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

Exercice 4

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



6

Question 1

Quel est le débit de poudre ?

Solution Q1

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

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

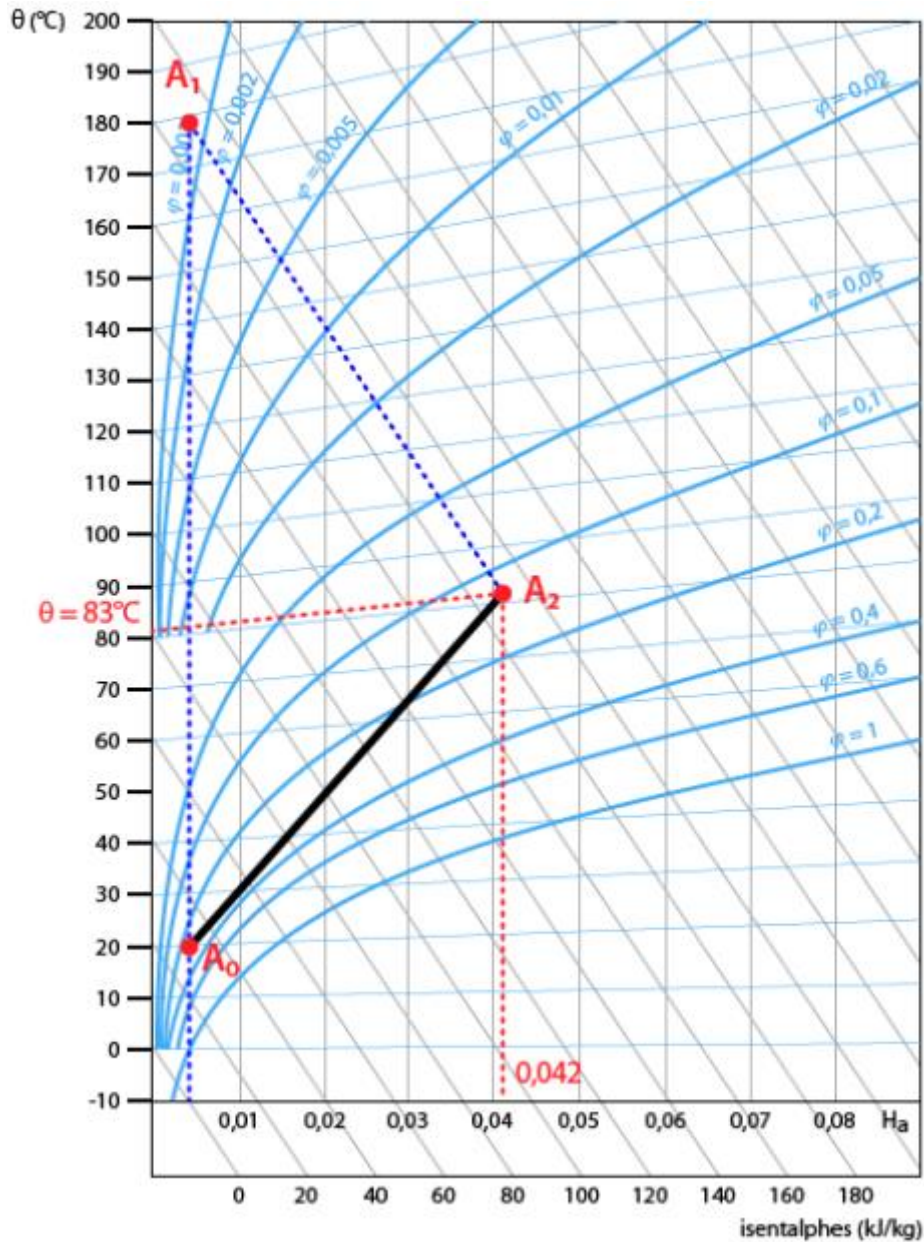
d'où $6300 \times 0,57 = 0,97 \times \dot{m}_p \implies \dot{m}_p = (6300 \times 0,57)/0,97 = 3702 \text{ kg/h}$

Question 2

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

Solution Q2

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



7

Question 3

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

Solution Q3

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

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)

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

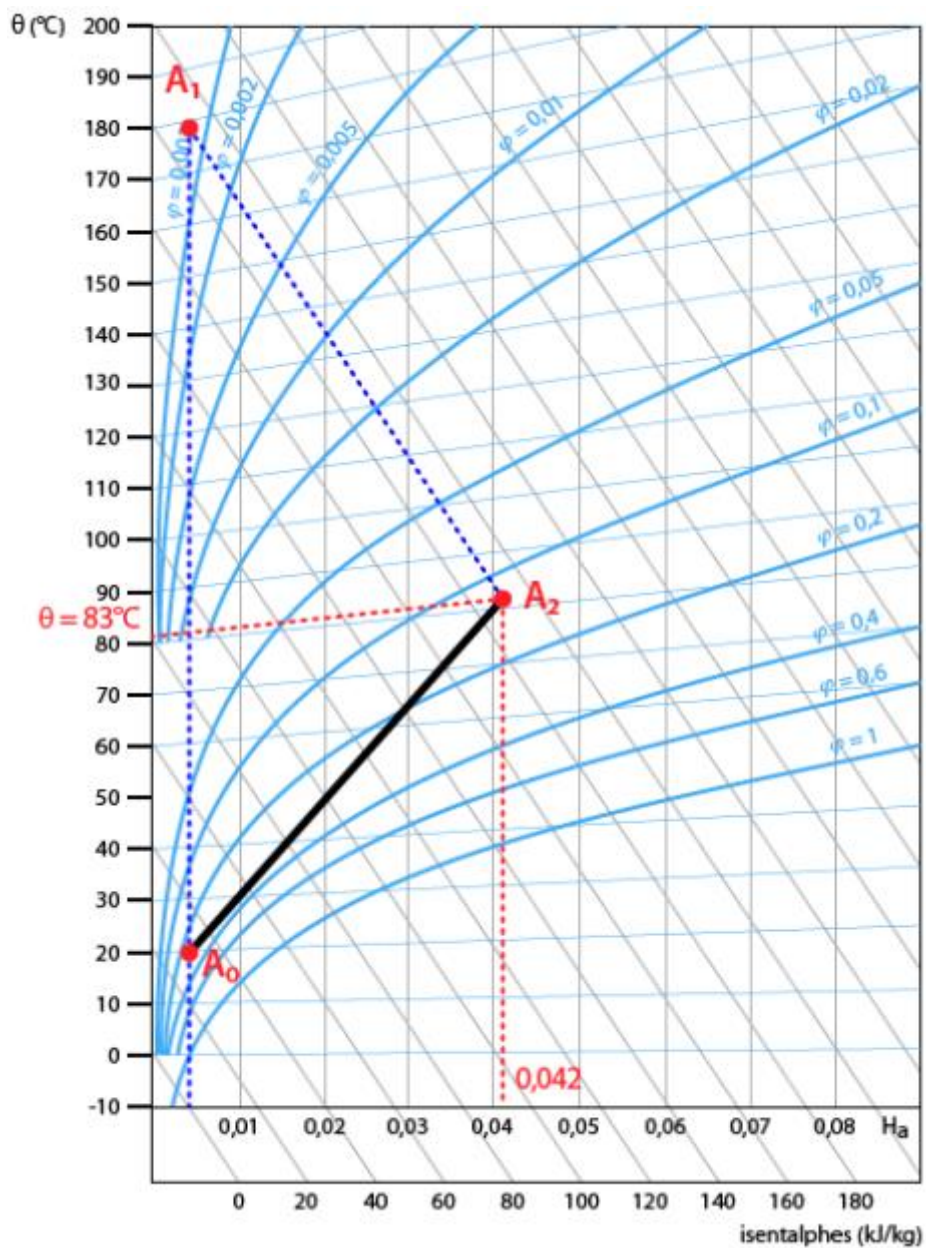
Ce qui veut dire que 1 kg d'air sec contient 1,005 kg d'air normal

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

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

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

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



Question 4

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 Q4

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

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

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

$$\text{D'où RCE} = 4405/2358 = 1,8 \approx 2$$

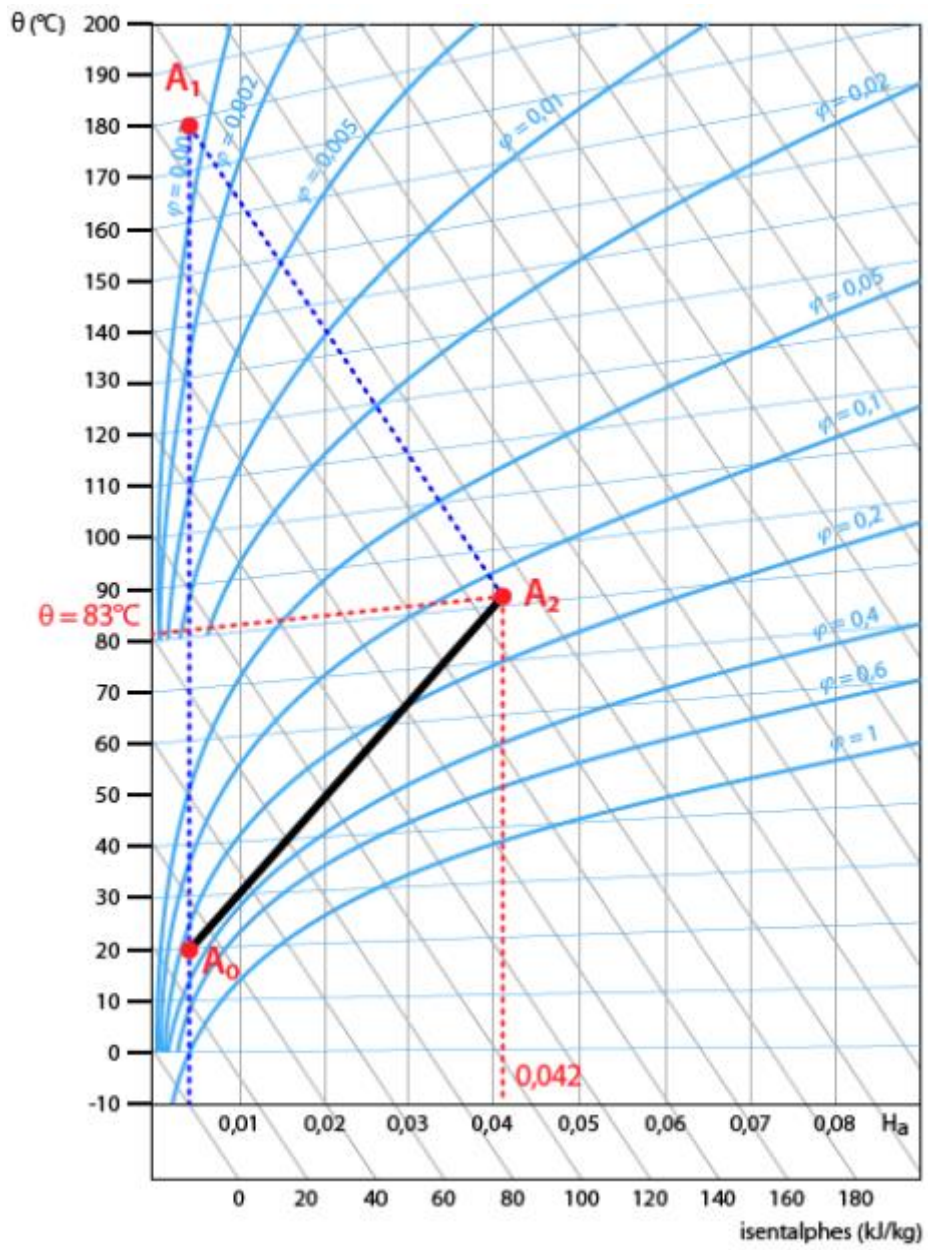
On dépense donc le double de l'énergie nécessaire

Question 5

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 Q5

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.



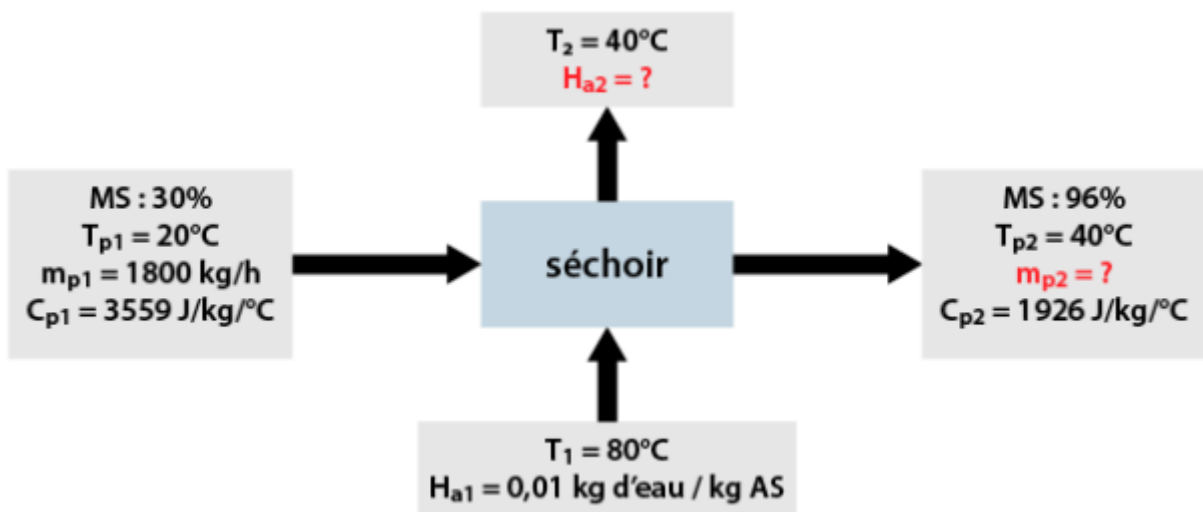
7

-

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 $T_1 = 80\text{ °C}$ et $H_a = 0,01\text{ kg d'eau/kg d'air sec}$ et quitte le sécheur à $T_2 = 40\text{ °C}$. 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 .



8

Question 1

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.

Solution Q1

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

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

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

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

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

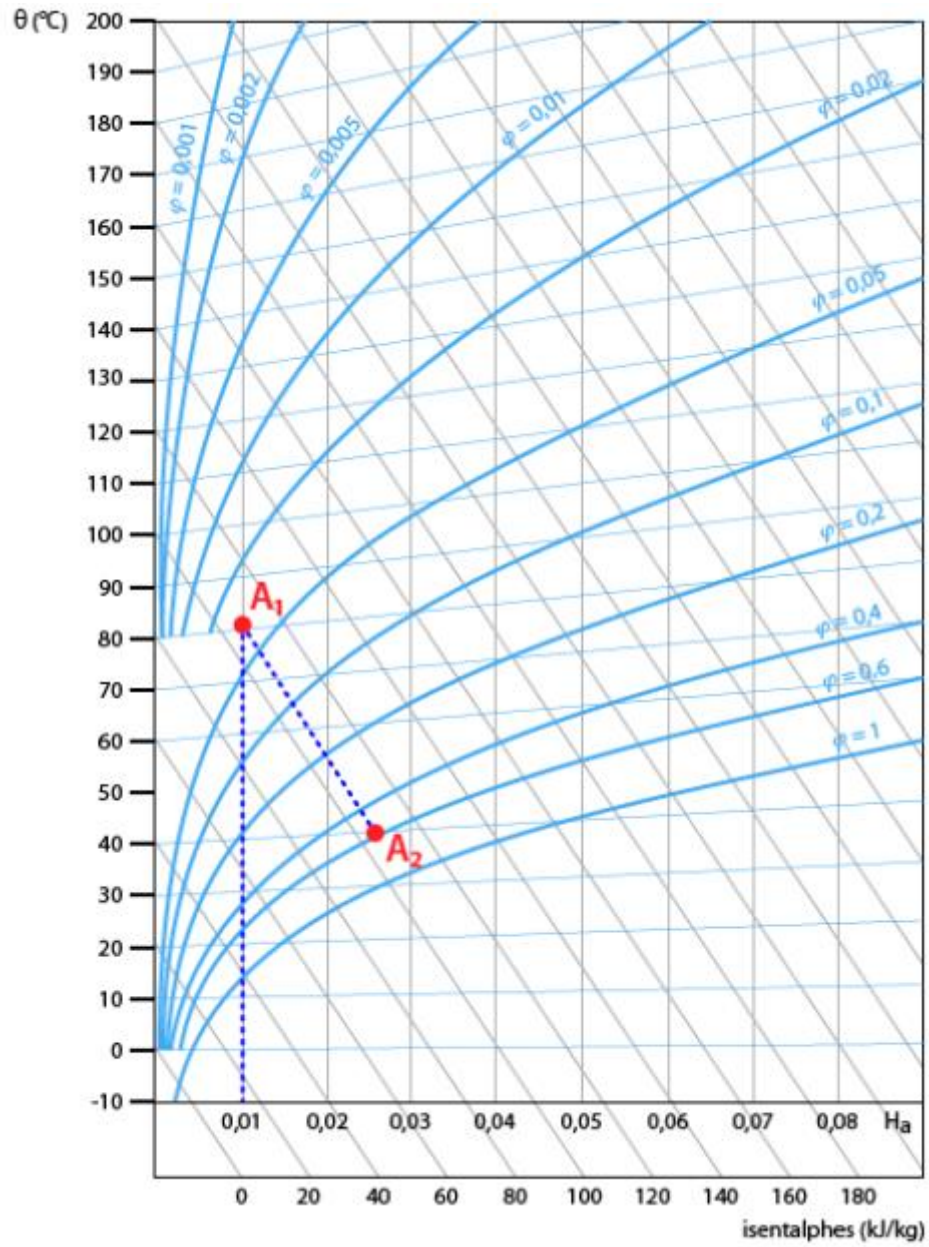
$$\text{Avec } \dot{m}_{pMS} = 1800 \times 0,3 = 540\text{ kg/h}$$

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

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

d'ou :

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



9

-

Référence :

Lien : https://tech-alim.univ-lille.fr/sechage/co/publiweb_Sechage.html

Coordination pédagogique :

Pascal Dhulster - enseignant-chercheur

Université de Lille - Sciences et Technologies

Auteurs :

Romdhane Karoui - enseignant-chercheur

Université d'Artois

Réalisation technique :

SEMM (Service Enseignement et Multimédia)

Université de Lille - Sciences et Technologies