

SÉCHAGE

Équipe de Formation

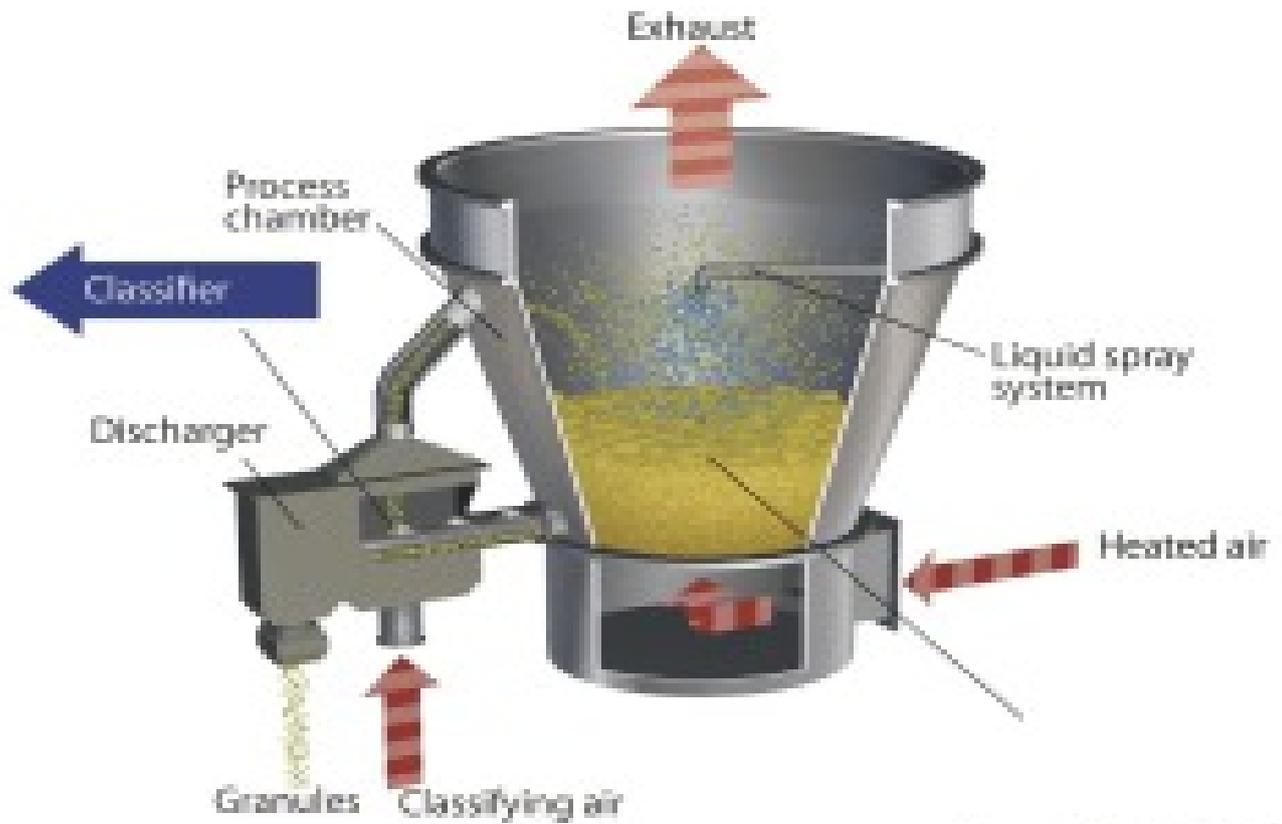


Table des matières



Objectifs	3
I - Définitions	4
II - Applications	7
III - Principe	8
1. Humidité relative d'équilibre et activité de l'eau	8
2. Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau	8
3. Principes physiques du séchage	11
IV - Calculs sur les séchoirs	14
1. Cinétique du séchage	14
2. Bilan sur les séchoirs	16
2.1. <i>Un séchoir par entraînement</i>	16
V - Caractéristiques techniques et applications des principaux types de séchoirs en industrie agro-alimentaire	18
VI - Exercice :	19
VII - Qualité des produits séchés	20
VIII - TEST	21



Objectifs

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.
- La surface du produit en contact avec l'air.

Influencent sur la :

- Vitesse de séchage.
- Qualité du produit séché.
- Coût de séchage.

SÉCHAGE = opération unitaire qui implique

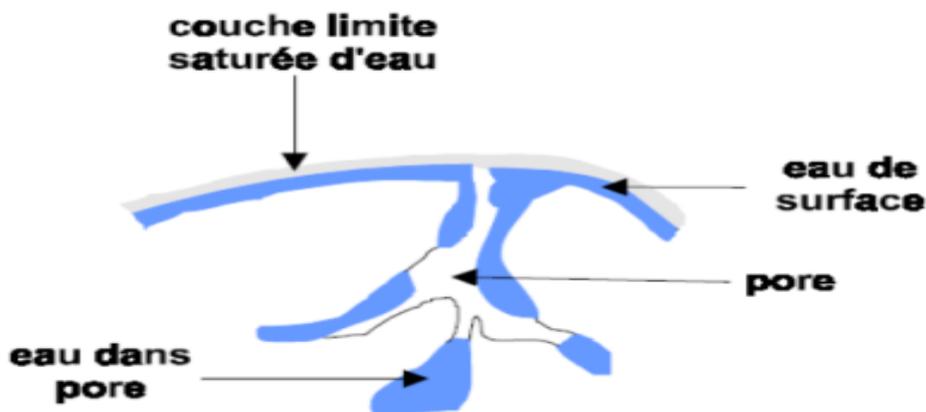
- Un transfert de matière (le liquide imprégnant le solide (liquide) passe à l'état de vapeur dans une phase gazeuse).
- Un transfert thermique (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide).

« Séchage consomme environ 15 % de l'énergie industrielle dans les pays développés »

- Toutes les parties d'un même produit n'ont pas le même comportement vis à vis de l'eau.
- Cela varie aussi d'un produit à l'autre, suivant sa composition biochimique.
- *Lorsque le produit est très humide, l'eau qu'il contient est qualifiée de « libre ».*
- Lors du séchage, l'eau libre se comporte comme de l'eau pure Il suffit pour la vaporiser d'environ 2250 kJ /kg.
- *Lorsque le produit est plus sec, l'eau est davantage retenue par celui-ci et on la qualifie de « liée » « L'évaporation de cette eau est plus difficile et demande plus d'énergie »*
- Au cours du séchage c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée.
- La quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente au cours du séchage.
- Le dernier gramme d'eau évaporé coûte beaucoup plus d'énergie que le premier.

Haut coût énergétique du séchage – complète les procédés de séparation mécanique : Sédimentation, Filtration, Essorage, Centrifugation etc.

- De manière intuitive - sécher avec un air plus chaud va prendre moins de temps qu'un séchage avec un air « tiède ».
- Si on considère l'aspect productivité, on a donc tout intérêt à sécher à haute température.
- Cependant une température élevée peut altérer le produit fini.



Applications

II

- Produits chimiques solides
- Biotechnologie et produits pharmaceutiques (levures , antibiotiques)
- Matériaux de construction (briques, carrelages)
- Industrie céramique (bols, assiettes,etc.)
- Matières plastiques
- Papiers
- Bois
- Produits agro- alimentaires :
 1. les pâtes alimentaires
 2. la viande fumée : saucisson, jambon...
 3. les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée
 4. les légumes (pois,...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots...)
 5. certains biscuits apéritifs sont produits par séchage à l'air chaud à partir d'une pâte de maïs
 6. les jus de fruits sont préparés à partir d'un concentré obtenu par vaporisation
 7. le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et séché jusqu'à devenir du sel raffiné
 8. la conservation de beaucoup de types de grains ou de végétaux est assurée par le séchage: (café,cacao,riz et autres céréales, feuilles de thé, épices...)
 9. Certains produits en poudre : cacao, lait, etc.

Principe

III

1. Humidité relative d'équilibre et activité de l'eau

L'eau dans les aliments présente différentes propriétés physico-chimiques 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.

- L'Humidité Relative d'Equilibre (HRE)

$$HRE = \frac{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à la température } \Theta}{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau saturante à la température } \Theta} \otimes 100 \quad HRE = \frac{P_w}{P_{w^\circ}} \otimes 100$$

- L'activité de l'eau

$$A_w = \frac{P_w}{P_{w^\circ}} = \frac{HRE}{100}$$

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 physico-chimiques, 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.

2. 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 2) 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.

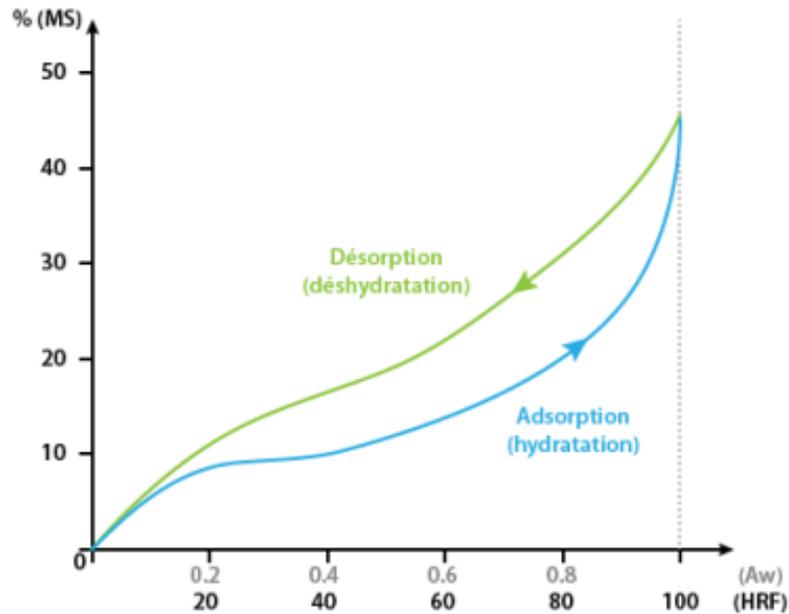


Figure 2 : Isotherme d'adsorption et de désorption de l'eau

En séchage, on s'intéresse particulièrement à la courbe de désorption qui peut être divisée en 3 zones (Figure 2) :

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 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 3). Les courbes des isothermes sont utiles pour prévoir le comportement des aliments suite aux traitements technologiques et aux conditions de stockage.

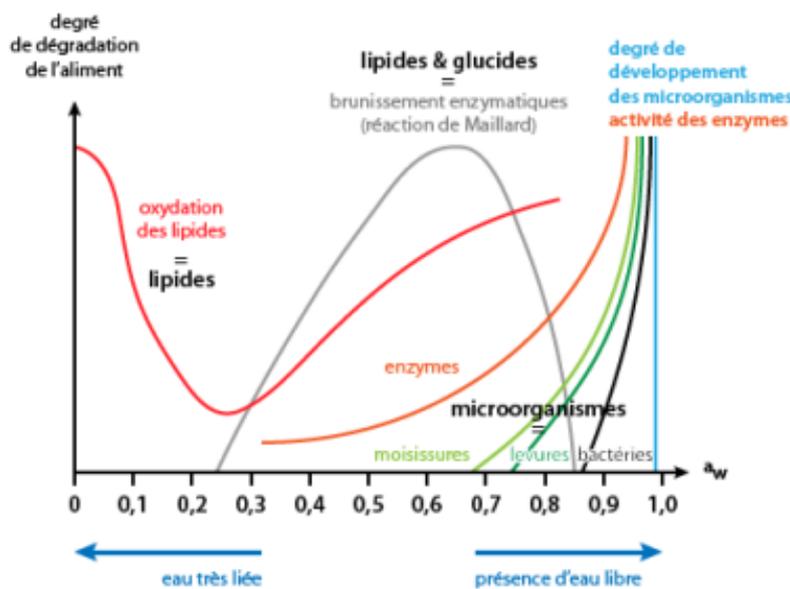


Figure 2 : Risque de détérioration des aliments en fonction de l' A_w

3. Principes physiques du séchage

Pour évaporer l'eau d'un produit, 2 mécanismes peuvent être mis en œuvre

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).

- Ce mode de séchage est tout à fait *analogue à une évaporation*
- Consiste à porter le produit à une température telle que la pression de vapeur du liquide volatil atteint la pression régnant dans l'appareil
- La température est obtenue par *le contact avec une paroi solide* portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...)
- Dans ces conditions *le liquide se vaporise* et le système est formé par le solide en cours de séchage et par une phase gazeuse constituée par les vapeurs du liquide
- Le séchage par ébullition est souvent utilisé lorsque l'on a affaire à des *liquides volatils* autres que l'eau et devant être récupérés
- Il est également appliqué dans le cas du séchage de produits aqueux congelés (*lyophilisation ou freeze drying*)
- Les vapeurs formées sont soit *aspirées* (cas du séchage sous pression réduite qui abaisse la température d'ébullition), soit entraînées par *un gaz de balayage* dont le débit est très faible par rapport à celui utilisé dans le cas d'un chauffage par convection
- Le séchage sous pression réduite permet de traiter *des produits facilement oxydables* à une température élevée
- Il est aussi très intéressant pour le séchage des substances thermosensibles qui ne supporteraient pas longtemps une température élevée
- Dans le cas d'un séchage discontinu on retrouve (tout comme pour le séchage par convection) deux périodes :
 - a) Une période à vitesse de séchage constant;
 - b) une période à vitesse de séchage décroissant.

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 4)

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...).

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.

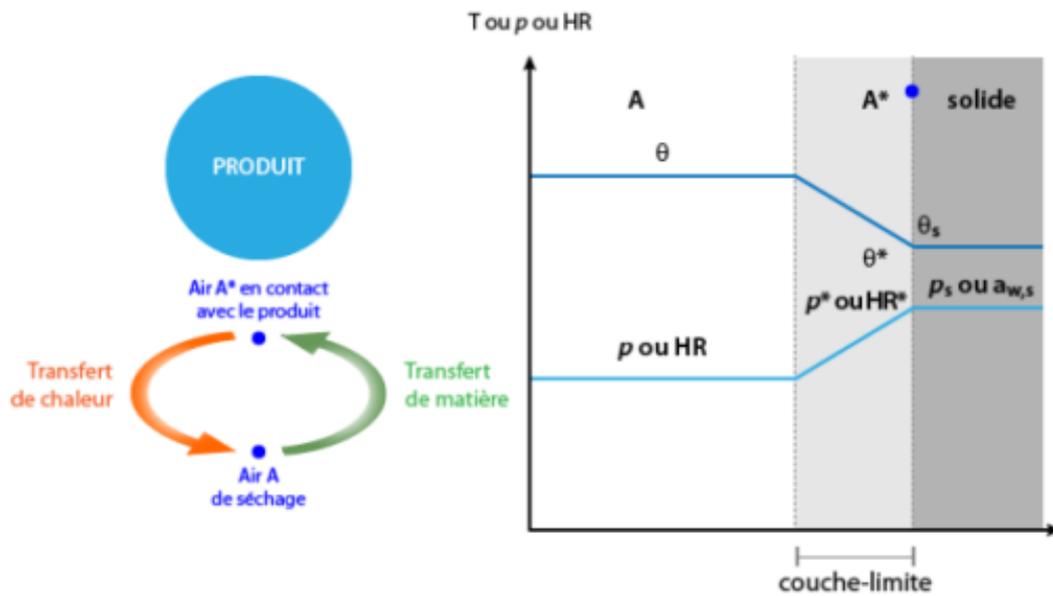


Figure 4 : Transfert entre l'air et la surface du produit

Le séchage par entraînement (convection) :

- Représente le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique.
- L'eau – le liquide à éliminer; l'air – le gaz d'entraînement.
- Réalisation: le solide à sécher en contact avec un courant gazeux chaud (le plus sec possible) – le gaz fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée.
- La température du gaz diminue entre l'entrée et la sortie alors que c'est le contraire pour le solide.
- Le système évolue vers un équilibre - la pression partielle des vapeurs du liquide tend vers une valeur normale.

Séchage par entraînement

① Séchage co-courant



- Il faut beaucoup d'air pour déshydrater le produit
- Procédé au rendement médiocre

② Séchage contre-courant



- Meilleur transfert de chaleur et d'humidité mais un produit altéré par la forte chaleur de l'air chaud

Calculs sur les séchoirs

IV

1. 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 ;

la vitesse de séchage (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 5) :

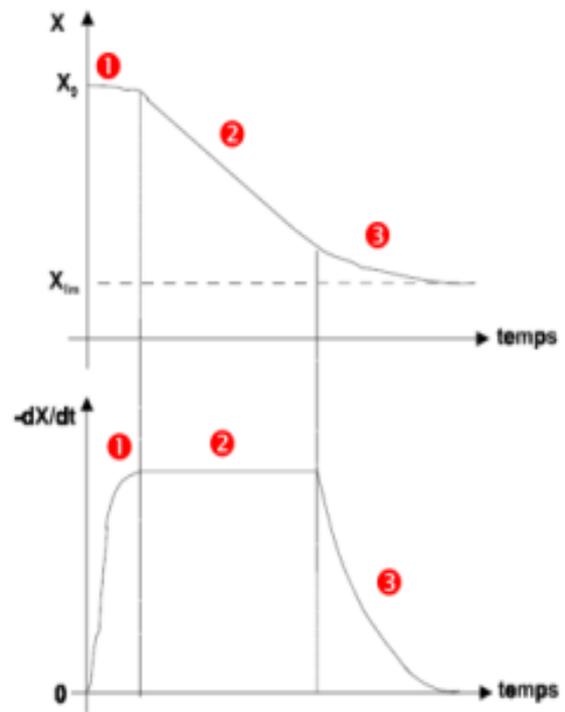
une *période 0 de mise en température du produit*, qui disparaît pratiquement lorsque le produit se présente sous forme de particules ou de feuilles ;

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' 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).

- ❶ Mise à température du solide
- ❷ Séchage à vitesse constante
- ❸ Séchage à vitesse décroissante

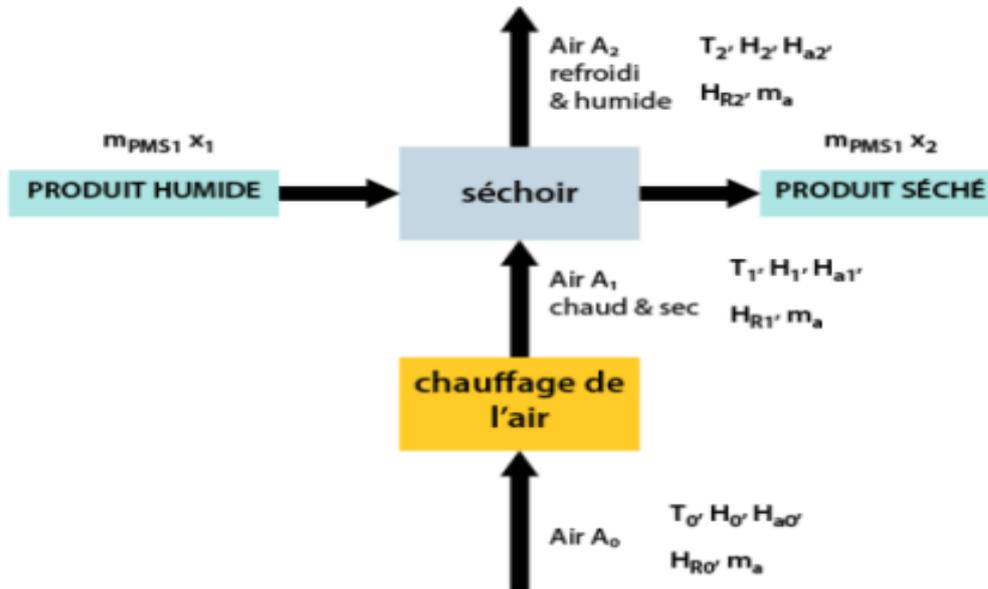


Courbes théoriques caractérisant un séchage par entraînement

2. Bilan sur les séchoirs

2.1. Un séchoir par entraînement

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

[cf. Bilan]

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 : $\frac{CEM}{\Delta H_v(\theta)}$, 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.

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

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

*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.

Transfert d'énergie

Enthalpie de l'air à l'entrée + Enthalpie du produit à l'entrée =

Enthalpie de l'air à la sortie + Enthalpie du produit à la sortie + les pertes d'énergie

Le débit du produit à l'entrée :

$$\dot{m}_{p1} = (M_1 + 1) \cdot \dot{m}_s$$

$$\dot{m}_{AS} \cdot h_{a1} + \dot{m}_{p1} \cdot C_{p1} \cdot T_{p1} = \dot{m}_{AS} \cdot h_{a2} + \dot{m}_{p2} \cdot C_{p2} \cdot T_{p2} + \dot{Q}_p$$

$$h_{a1} = 2499,6 \cdot H_1 + (1,005 + 1,881 \cdot H_1) \cdot T_{a1}$$

$$h_{a2} = 2499,6 \cdot H_2 + (1,005 + 1,881 \cdot H_2) \cdot T_{a2}$$

Le débit du produit à la sortie :

$$\dot{m}_{p2} = (M_2 + 1) \cdot \dot{m}_s$$

h_{a1}= Enthalpie de l'air à l'entrée du sécheur (kJ/kgAS)

h_{a2}= Enthalpie de l'air à la sortie du sécheur (kJ/kgAS)

h_{p1}= Enthalpie de l'air à l'entrée du sécheur (kJ/kgAS)

h_{p2}= Enthalpie de l'air à la sortie du sécheur (kJ/kgAS)

C_{p1} = chaleur massique du produit à l'entrée (kJ/Kg.°C)

C_{p2} = chaleur massique du produit à la sortie (kJ/Kg.°C)

M₁ = teneur en eau du produit à l'entrée (kg eau/kg produit sec)

M₂ = teneur en eau du produit à la sortie (kg eau/kg produit sec)

\dot{m}_{AS} = débit d'air sec (kg/s)

\dot{m}_s = débit de matière sèche à l'entrée (kg m.s/s)

\dot{m}_{p1} = débit massique du produit à l'entrée (kg/s)

\dot{m}_{p2} = débit massique du produit à la sortie (kg/s)

T_{p1} = température du produit à l'entrée (°C)

T_{p2} = température du produit à la sortie (°C)

Exercice :



Ex01: 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 .

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.

Ex02 : Une tour de séchage par pulvérisation traite $2,5\text{ t/h}$ 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 $1,7\text{ kJ/kg/°C}$.

1. Déterminer le bilan matière (débit de poudre et quantité d'eau évaporée) ?
2. Déterminer le bilan thermique ou énergétique ?

TD Séchage

[cf. TD]

Qualité des produits séchés

VII

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.

[cf.]

TEST

VIII

Objectifs

Vous allez à présent effectuer une série d'exercices d'auto-évaluation.

Une synthèse vous sera présentée à la fin de cette série d'exercices.

Exercice

Le séchage aboutit généralement à la formation d'un produit :

- solide
- liquide
- semi-solide

Exercice

Pour sécher efficacement un solide humide, il faut :

- un air le plus sec possible
- un air le plus chaud possible
- un air le plus sec et le plus chaud possible

Exercice

La température d'ébullition d'un produit dépend de :

- la pression
- l'activité de l'eau
- l'activité de l'eau et de la pression

Exercice

Le diagramme enthalpique de l'air humide peut être utilisé à des pressions autres que la pression atmosphérique

- vrai
- faux

Exercice

La pression de vapeur d'eau dans un produit détermine les échanges entre l'air et le produit dans le cas de :

- séchage par entraînement
- séchage par ébullition
- séchage par entraînement et ébullition

Exercice

Lorsqu'on chauffe un air

- ses Ha et HR augmentent
- ses Ha et HR diminuent
- son Ha reste constante et son HR augmente
- son Ha reste constante et son HR diminue

Exercice

Le rapport de consommation énergétique $RCE = CEM/\Delta H_{v\theta}$, où $\Delta H_{v\theta}$ est :

- l'énergie latente de vaporisation de l'eau à la température de l'entrée du produit
- l'énergie latente de vaporisation de l'eau à la température de sortie du produit
- l'énergie latente de vaporisation de l'eau à la température moyenne du produit

Exercice

La température de rosée est définie comme étant :

- la température à l'équilibre de l'air humide amenée à saturation sans changement de son humidité absolue
- la température à l'équilibre de l'air humide amenée à saturation avec augmentation de son humidité absolue
- la température à l'équilibre de l'air humide amenée à saturation avec diminution de son humidité absolue

Exercice

La température du thermomètre humide correspond à :

- la température à laquelle il faut refroidir l'air humide (avec changement de son humidité absolue) pour atteindre la saturation
- la température à laquelle il faut refroidir l'air humide (sans changement de son humidité absolue) pour atteindre la saturation

Exercice

L'enthalpie de l'air humide correspond à :

- l'enthalpie de l'air
- l'enthalpie de la vapeur d'eau
- somme de l'enthalpie de l'air et l'enthalpie de la vapeur d'eau
- différence entre l'enthalpie de l'air et l'enthalpie de la vapeur d'eau

Exercice

Lors du séchage d'un produit alimentaire, les phénomènes limitant de séchage sont dus aux :

- transfert interne de matière pour le cas d'un séchage par entraînement
- transfert interne de matière pour le cas d'un séchage par ébullition
- transfert de chaleur pour le cas d'un séchage par ébullition
- transfert de chaleur pour le cas d'un séchage par entraînement