

Chapitre 2: Théorie de séchage

1.1 Terminologie du séchage

1.1.1 Séchage

Le séchage peut être défini comme la vaporisation et l'élimination de l'eau ou d'autres liquides d'une solution, suspension ou un autre mélange solide-liquide pour former un solide sec. C'est un processus complexe qui implique un transfert simultané de chaleur et de masse, accompagné de transformations physico-chimiques.

Pendant le séchage, au moins deux processus principaux se produisent simultanément:

- ✓ le transfert de chaleur du milieu environnant vers le matériau humide pour évaporer l'humidité à la surface du matériau
- ✓ le transfert de l'humidité interne vers la surface du solide.

D'autres processus peuvent se produire dans certains cas, à savoir des transformations physiques et chimiques qui peuvent induire des changements dans la structure des solides et des fluides impliqués.

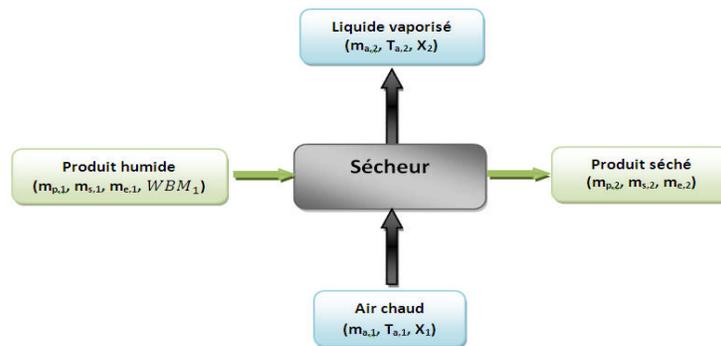


Fig. 1 : Principe de séchage

1.1.2 Humidité

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

1.1.3 Taux d'humidité

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher.

1.1.4 États de siccité

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul. Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

1.1.5 Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température.

1.1.6 Isotherme d'adsorption

C'est la courbe représentant la variation du taux d'humidité à l'équilibre en fonction de l'humidité relative, égale au rapport entre la pression partielle du solvant et sa pression de vapeur saturante à la température considérée. Les courbes obtenues en réhydratant le produit, sont en général différentes de celles obtenues en le déshydratant. Il se produit un

phénomène d'hystérésis. En matière de séchage ne sont à considérer que les isothermes obtenues en plaçant le produit dans des atmosphères dont l'humidité relative est de plus en plus faible.

1.1.7 Corps hygroscopique

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit. Cet abaissement de pression est dû au fait que l'humidité est soit adsorbée à la surface du solide, soit en solution dans celui-ci. Les isothermes d'adsorption permettent de caractériser le comportement hygroscopique.

1.2 Mécanismes intervenant au cours de séchage

1.2.1 Transfert de chaleur

Il existe trois modes de base de transfert de chaleur, comme représenté sur la figure 1, la conduction, la convection et le rayonnement. En générale, le transfert de chaleur à travers des parois solides se fait uniquement par conduction, comme indiqué dans la configuration (figure 1a). Comme le montre la figure 1b, si un fluide s'écoule sur un corps solide de température différente, alors le mécanisme de transfert de chaleur se fait généralement par convection. Aussi, entre les deux plaques comme le montre la figure 1c, placées dans de l'air raréfié et ayant une grande différence de température entre elles le transfert de chaleur se font par rayonnement.

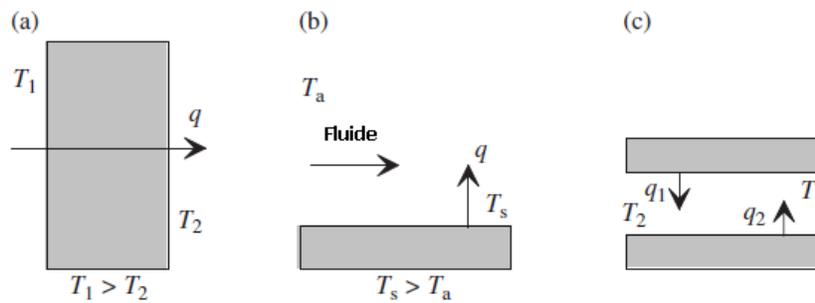


Fig. 2 : Représentations schématiques des modes de transfert de chaleur: (a) Conduction à travers un solide. (b) Convection d'une surface à un fluide en mouvement. (c) Rayonnement entre deux surfaces

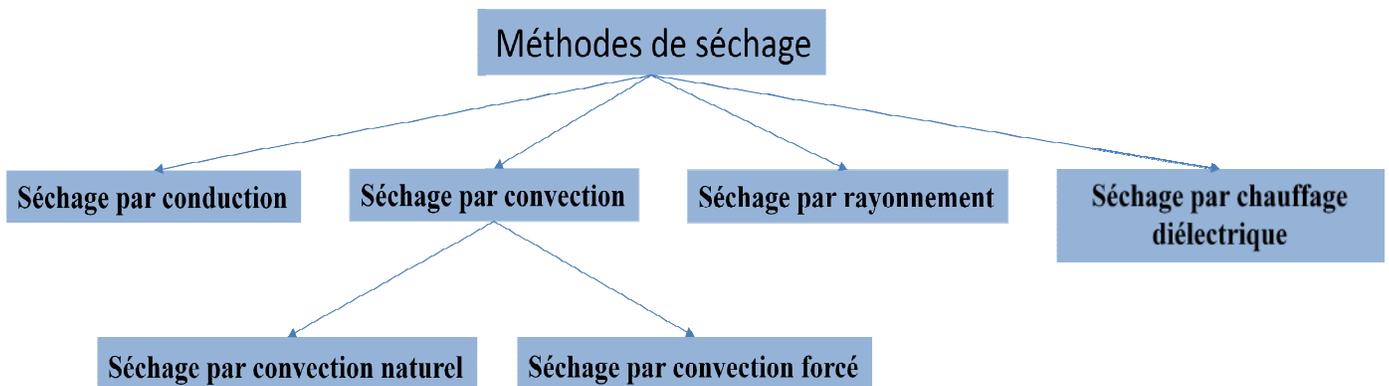


Fig. 3 : Méthodes de séchage

1.2.1.1 Séchage par convection

L'énergie thermique du milieu de séchage est transmise par convection aux matériaux humides qui sont en contact direct avec le flux d'air chaud. Dans le séchage par convection, l'air chaud en tant que milieu de séchage est à la fois un caloporteur et un porteur humide.

a) Séchage par convection naturel

Le séchage naturel est l'un des processus les plus fondamentaux qui est généralement conduit en exposant des matériaux à l'air atmosphérique, au vent ou au rayonnement solaire. Certains exemples bien connus de séchage naturel sont le séchage des produits alimentaires sur des étagères ou des berceaux, le séchage de l'herbe, des récoltes et des céréales, ou le séchage de la peinture, des briques, du béton et d'autres matériaux de construction.

Les avantages de séchage naturel :

- ✓ n'implique pas de coûts élevés; c'est donc une méthode très pratique pour sécher les biomasses qui seront éventuellement utilisées comme combustibles ;
- ✓ les gradients de température et de concentration sont faibles; cela permet un processus fluide qui ne détériore pas les produits et n'induit pas de contraintes mécaniques; par conséquent, malgré un temps de séchage plus long, dans de nombreuses applications, de meilleurs produits sont obtenus en utilisant un séchage naturel.

b) Séchage par convection forcé

La convection forcée est largement utilisée dans le système de séchage; cela nécessite l'utilisation d'un système de débit actif tel que des soufflantes et des ventilateurs. Plusieurs systèmes utilisent la convection forcée qui augmente le taux de séchage au détriment d'une grande consommation d'énergie requise par les soufflantes ou les ventilateurs.

Le séchage par transfert de chaleur suit l'équation suivante (Loi de Newton):

$$Q = hS(T_a - T_s)$$

Avec :

Q : Quantité de chaleur transférée ; [W]

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ; [$\frac{W}{m^2 K}$]

T_a : Température du gaz de séchage (air) ; [K]

T_s : Température superficielle du produit à sécher; [K]

S : Surface d'échange ; m^2

Pour définir la surface d'échange on utilise le diamètre moyen des grains.

1.2.1.2 Séchage par conduction

L'énergie thermique est transmise aux matériaux humides par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont soit aspirées (séchage par ébullition) soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit est faible. Le flux thermique est donné par la relation suivante (Loi de Fourier):

$$Q = -\lambda S \frac{dT_s}{dx}$$

λ : Conductivité thermique ; $\frac{W}{m K}$

$\frac{dT_s}{dx}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit ; $\frac{K}{m}$

1.2.1.3 Séchage par rayonnement:

L'énergie thermique est produite par l'émission d'une source de rayonnement infrarouge sous la forme d'ondes électromagnétiques projetées sur la surface du matériau pour l'évaporation de l'eau. Cette méthode est également appelée séchage infrarouge, et l'électricité et le charbon peuvent être utilisés comme source de rayonnement infrarouge.

$$Q = A_1 C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \sigma$$

T_1 : Température de la source émettrice ; [K]

T_2 : Température du produit; [K]

A_1 : Surface du corps recevant le rayonnement ; m^2

A_2 : Surface de l'émetteur d'infrarouge ; m^2

ε_1 : Émissivité du produit à traiter ;

ε_2 : Émissivité de l'émetteur ;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ; $(\sigma = 5.673 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^{-2} K^{-4}})$.

φ : Facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit, on a $\varphi = 1$),

1.2.1.4 Séchage par chauffage diélectrique:

Cette méthode consiste à insérer une électrode dans le matériau. Un moteur est utilisé pour fournir un courant alternatif à haute fréquence, et la chaleur interne générée par la perte diélectrique est utilisée comme source de chaleur pour le séchage. Cette méthode est également appelée séchage à haute fréquence, qui se caractérise par l'uniformité du chauffage dans le matériau.

1.3 Phases de séchage

La figure 2 montre la variation typique de la teneur en humidité pendant le séchage pour un cas général où un solide humide perd de l'humidité.

1. la première partie du processus, représentée par la courbe A–B, se produit par transfert de masse à partir de la surface solide. Il s'agit d'une étape de réchauffement du ou des solides au cours de laquelle les conditions de surface solide viennent en équilibre avec l'air de séchage. Pendant cette période, le matériau humide peut même prendre plus d'humidité au lieu d'être séché, en fonction des conditions réelles.
2. Pendant la période B–C, le mouvement de l'humidité à l'intérieur du solide est suffisamment rapide pour maintenir un état saturé à la surface, et la vitesse de séchage est contrôlée par la vitesse à laquelle la chaleur est transférée à la surface d'évaporation. Cette étape est contrôlée par les coefficients de transfert de chaleur et/ou d'humidité, la surface exposée au milieu de séchage et la différence de température et d'humidité relative entre l'air de séchage et la surface humide du solide.
3. Pendant la phase C–D, il n'y a pas d'évaporation en surface, mais plutôt un processus de diffusion de l'humidité au sein du solide suivi d'un transfert de masse convectif à la surface du solide. À partir du point C, la température de surface commence à augmenter et continue de le faire au fur et à mesure que le séchage se poursuit, se rapprochant de la température sèche de l'air.

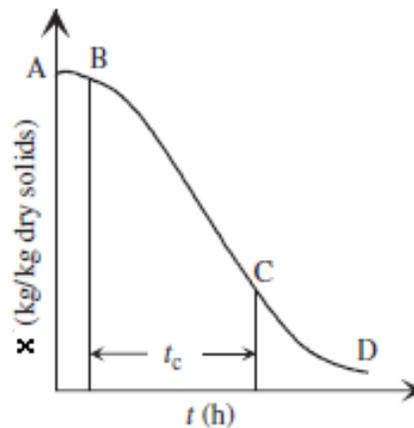


Fig. 2 Les phases de séchage pour un solide