

Chapitre 3 : Principes de calcul des sécheurs

Il existe de nombreux types d'équipements et de systèmes de séchage utilisés pour le séchage des produits dans la transformation des aliments, les produits pharmaceutiques, les matériaux de construction et d'autres industries. Les équipements de séchage peuvent être des systèmes techniques simples ou plus complexes conçus pour effectuer des opérations de transfert de masse de manière optimale, de sorte que la vitesse de séchage soit maximisée (ou le temps de séchage soit minimisé) d'une manière rentable.

3.1 Mode de détermination des paramètres de calcul

Les paramètres essentiels déterminés par les essais sont :

- les températures sèches (θ_s) et humides (θ_h) de l'air de séchage avant et après son utilisation ;
- le temps de séchage du produit dans les différentes conditions de température de l'air ;
- la température finale du produit dans les différentes conditions de température de l'air ;
- les masses volumiques du produit humide, du produit sec et du produit anhydre ;
- les enthalpies de changement d'état du produit au cours de son séchage ;
- la capacité thermique du produit anhydre.

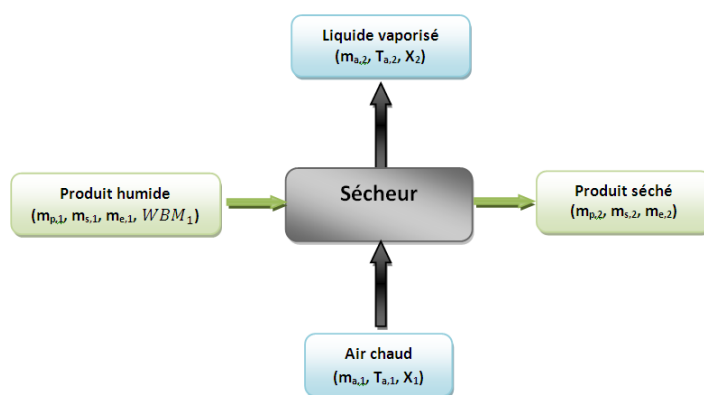


Fig. 1 : Schéma de principe du sécheur ou séchoir

3.2 Sécheur à bande transporteuse

Le sécheur à bande transporteuse est un sécheur à plusieurs étages chauffé à la vapeur utilisée pour déshydrater les légumes. La longueur du sécheur correspond au temps requis pour évaporer des quantités significatives d'humidité. Le sécheur est de conception sanitaire (hygiénique) avec des pièces de contact en acier inoxydable et un nettoyage simple.

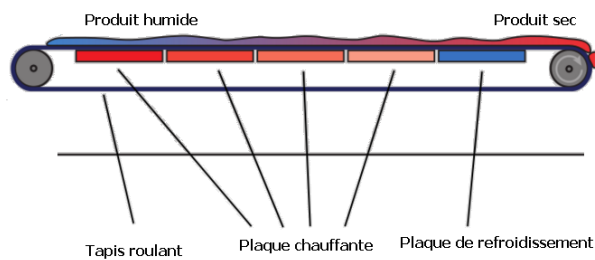
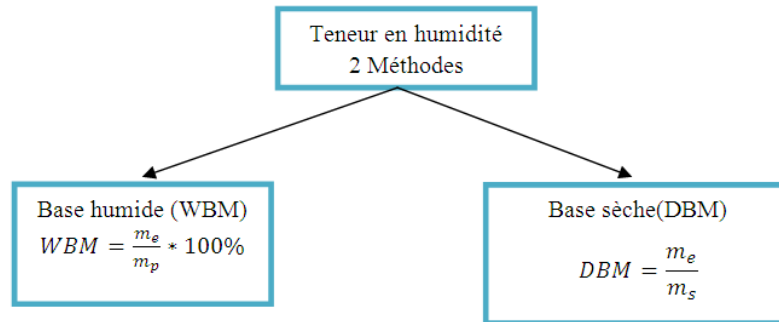


Fig. 2 : Schéma du sécheur à bande transporteuse

3.2.1 Calcul d'un sécheur à bande transporteuse



WBM : Wet basis moisture (Teneur en humidité d'un produit de base humide) ;

DBM : Dry basis moisture (Teneur en humidité d'un produit de base sèche) ;

m_p : Masse de produit ;

m_e : Masse d'eau contenue dans le produit ;

m_s : Masse de solide contenue dans le produit.

a) Bilan de matière sur le produit à sécher

	produit à sécher	produit solide	Eau contenue dans le produit
Entrée	$\dot{m}_{p,1}$	$\dot{m}_{s,1} = \frac{\dot{m}_{p,1}}{1 + n_{s,1}}$	$\dot{m}_{e,1} = \dot{m}_{p,1} \left(\frac{n_{s,1}}{1 + n_{s,1}} \right)$
Sortie	$\dot{m}_{p,2}$	$\dot{m}_{s,2} = \frac{\dot{m}_{p,2}}{1 + n_{s,2}}$	$\dot{m}_{e,2} = \dot{m}_{p,2} \left(\frac{n_{s,2}}{1 + n_{s,2}} \right)$

n_s : Taux d'humidité du produit,

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p - \dot{m}_e$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p \left(1 - \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_p} \right) = \dot{m}_p \left(1 - \frac{WBM}{100} \right) = \frac{\dot{m}_p}{1 + n_s}$$

$$\text{avec } \frac{WBM}{100} = \frac{n_s}{n_s + 1}$$

Conservation du produit

$$\dot{m}_{s,1} = \dot{m}_{s,2} \Rightarrow \dot{m}_{p,2} = \dot{m}_{p,1} \frac{1 + n_{s,2}}{1 + n_{s,1}}$$

Débit d'eau à évaporer

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{e,1} - \dot{m}_{e,2} = \dot{m}_{p,1} \frac{n_{s,1}}{1 + n_{s,1}} - \dot{m}_{p,2} \frac{n_{s,2}}{1 + n_{s,2}}$$

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_e = \dot{m}_{p,1} \left(\frac{n_{s,1} - n_{s,2}}{1 + n_{s,1}} \right) \quad (1)$$

b) Bilan de matière sur l'air de séchage

	Air sec	Air humide	Eau
Entrée	$\dot{m}_{a \text{ sec}}$	$\dot{m}_{a,1}$	$\dot{m}_{eau,1} = \dot{m}_{a \text{ sec}} * X_1$
Sortie	$\dot{m}_{a \text{ sec}}$	$\dot{m}_{a,2}$	$\dot{m}_{eau,2} = \dot{m}_{a \text{ sec}} * X_2$

$$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a \text{ sec}} + \dot{m}_{e,1}$$

$$\dot{m}_{a \text{ sec}} = \frac{\dot{m}_{a,1}}{1 + X_1} = \frac{\dot{m}_{a,2}}{1 + X_2}$$

Débit d'eau évaporée

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{a,1} \left[\frac{X_2 - X_1}{1 + X_1} \right] = \dot{m}_{a \text{ sec}} * X_1 - \dot{m}_{a \text{ sec}} * X_2 \quad (2)$$

Débit d'air de séchage :

$$(1) = (2) \Leftrightarrow \dot{m}_{a \text{ sec}} = \dot{m}_{p,1} \left(\frac{n_{s,1} - n_{s,2}}{(1 + n_{s,1})(X_2 - X_1)} \right)$$

c) Bilan thermique ou énergétique

- Energie apportée par l'air de séchage :

$$Q_a = h * \dot{m}_{a \text{ sec}}$$

- Flux thermique du produit humide

$$Q_{p,1} = \dot{m}_{p,1} * C_{p1} * T_{p,1}$$

- Flux thermique du produit séché

$$Q_{p,2} = \dot{m}_{p,2} * C_{p2} * T_{p,2}$$

$$\sum \text{Entrée} = Q_{a,1} + Q_{p,1}$$

$$\sum \text{Sortie} = Q_{a,2} + Q_{p,2}$$

- L'énergie nécessaire par heure pour évaporer l'eau

$$E = m_e * Lv$$

Lv : La chaleur latente de vaporisation de l'eau est : $Lv = 2260 \text{ kJ/kg}$

d) L'efficacité du sécheur

$$RCE = \frac{CEM}{L_v}$$

CEM : Quantité de chaleur à fournir à un séchoir pour évaporé 1kg d'eau

$$CEM = \frac{h_2 - h_0}{X_2 - X_0}$$

L_v : La chaleur latente

$$L_v = 2.5 * 10^6 - 2.38 * 10^3 * T$$

$T(^{\circ}C)$

3.3 Sécheur pneumatique

Ce type de séchoir comprend un ventilateur et un chauffage, un dispositif d'alimentation en matériau humide et une chambre de séchage verticale. Le solide se disperse dans le grand courant d'air. Par conséquent, ils sont maintenus en suspension et transportés rapidement vers le haut où le séchage se produit principalement. De plus, les solides sont séparés dans le cyclone, car les solides s'écoulent aux extrémités en raison des forces centrifuges, tandis que le gaz est extrait du centre.

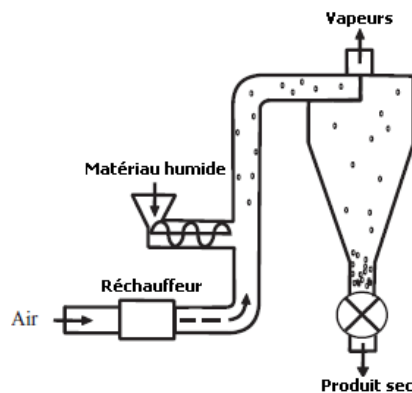


Fig. 3 : Schéma du sécheur pneumatique

a) Avantages

- Temps de contact court et écoulement parallèle permettant de sécher des matériaux thermolabiles ;
- Le sécheur n'a besoin que d'une très petite surface et peut être installé à l'extérieur d'un bâtiment ;
- En raison du petit nombre de pièces mobiles, le coût d'entretien est faible ;
- Les coûts d'investissement sont faibles par rapport à d'autres types de séchoirs ;
- Séchage simultané et le transport est utile pour le processus de manutention des matériaux.

b) Inconvénients

- Une efficacité élevée d'un système d'épuration des gaz est requise.
- En raison des émissions de poudre, le sécheur ne peut pas être utilisé pour des matières toxiques.

3.3.1 Calcul et dimensionnement d'un sécheur pneumatique

- Bilans de matières

$$\dot{m}_e = \frac{\dot{m}_{p,1}(X_1 - n_{s,2})}{(1 + n_{s,1})(X_2 - X_1)}$$

- Le diamètre du sécheur

$$D = D_{essai} \sqrt{\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a,essai}}}$$

- L'écart moyen logarithmique de température entre l'air ambiant et l'air respectivement à l'entrée et à la sortie du sécheur

$$\Delta T = \frac{T_{a,1} - T_{a,2}}{\ln \frac{T_{a,1} - T_{a,0}}{T_{a,2} - T_{a,0}}}$$

$T_{a,0}$: Température de l'air ambiant ;

$T_{a,1}$: Température de l'air entrant dans le sécheur ;

$T_{a,2}$: Température finale de l'air.

- L'énergie, Q

$$\frac{Q}{\dot{m}_a} = C_{p,a}(T_{a,1} - T_{a,0}) + n_{a,1}C_{p,v}(T_{a,1} - T_{a,0})$$

3.4 Sécheur rotatif

Le plus ancien et le plus courant utilisé pour les applications industrielles. Il s'agit d'un des sécheurs à contact direct à fonctionnement continu constitué d'une coque cylindrique à rotation lente qui est généralement inclinée à l'horizontale de quelques degrés pour faciliter le transport de la charge humide. Cette dernière est introduite dans le tambour à l'extrémité supérieure et le produit séché est retiré à l'extrémité inférieure. La surface interne du tambour peut avoir des chicanes ou des ailettes pour canaliser l'air chaud ou le mettre en cascade avec le matériau.

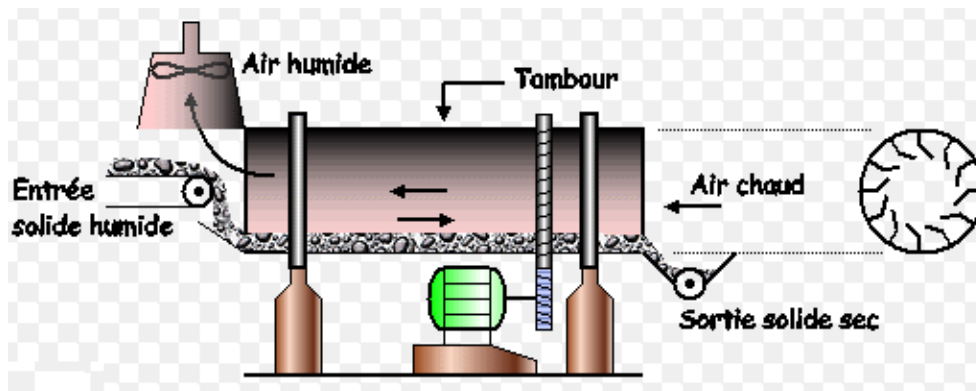


Fig. 4 : Schéma simplifié du sécheur rotatif

3.4.2 Détermination des paramètres de sécheur rotatif

3.4.2.1 Coefficient d'échange volumique

Le coefficient d'échange volumique varie le long du sécheur. Il est défini par la formule suivante :

$$\overline{U}_a = \frac{\dot{m}_a C_{p_a} (T_{a,1} - T_{a,2})}{V_T \Delta T_m}$$

D : Diamètre du sécheur ; [m]

L : Longueur du sécheur ; [m]

V_T : volume de l'appareil ; [m³]

$$V_T = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

ΔT_m : Écart moyen de température entre le gaz de séchage (air) et le produit ; [K]

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_i - \Delta T_f}{\ln \frac{\Delta T_i}{\Delta T_f}}$$

ΔT_i : Écart des températures initiales de l'air de séchage et du produit,

ΔT_f : Écart des températures finales de l'air de séchage et du produit,

3.4.2.2 Débit d'air spécifique G

$$G = \frac{\dot{m}_a}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

3.4.2.3 Diamètre de l'appareil

$$D = \frac{\dot{m}_a}{G} \frac{4}{\pi}$$

3.4.2.4 Vitesse de rotation

$$N = \frac{U_p}{\pi d}$$

U_p : vitesse périphérique de la virole ; [m/min]

d : Diamètre de la virole ; [m]

3.4.2.5 Temps de séchage

$$t_s = \frac{V_p}{\dot{m}_{p,0}} \rho_{app} \frac{1}{60} = \frac{D^2 * \frac{\pi}{4} * \varepsilon' * \rho_{app} * L}{60 * \dot{m}_{p,0}}$$

V_p : Volume de produit contenu dans le tube ; [m³]

ε' : Coefficient de remplissage ($\varepsilon' = V_p/V_T$) varie de 0,1 à 0,3.

$\dot{m}_{p,0}$: Débit massique de produit à l'entrée du sécheur ; [kg/s]

3.5. Sécheur à lit fluidisé

Le séchage à lit fluidisé est la technique la plus utilisée pour le séchage des poudres pharmaceutiques et la granulation. Dans ce type de sécheur, l'air chaud est passé à haute pression à travers un fond perforé du récipient contenant les granulés à sécher.

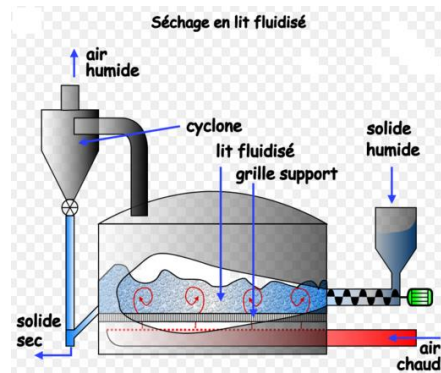


Fig. 4 : Schéma du sécheur à lit fluidisé

a) Avantages d'un sécheur à lit fluidisé

- a une durée de vie plus longue ;
- nécessite moins de temps pour terminer le séchage, c'est-à-dire 20 à 40 min ;
- excellentes capacités de mélange et de séchage ;
- L'efficacité thermique est 2 à 6 fois supérieure à celle du séchoir à plateaux ;

b) Inconvénients

- L'équipement est encombrant et cher.

3.5.2 Détermination des paramètres de sécheur à lit fluidisé

3.5.2.1 Capacité thermique massique du produit humide

- En réchauffage primaire

$$C_{p(RP)} = C_{ps} + n_{s,1} C_{pe}$$

- En réchauffage final

$$C_{p(RF)} = C_{ps} + \frac{n_{s,cr} + n_{s,2}}{2} C_{pe}$$

La masse d'air nécessaire à la désorption de l'eau libre par kilogramme de produit sec est donc égale à :

$$\sigma_L = \frac{n_{s,1} - n_{s,cr}}{\zeta(X_2 - X_1)}$$

ζ : Coefficient permettant de définir la qualité de l'échange.

- La masse d'air nécessaire pour désorber l'eau liée

$$\sigma_l = \frac{n_{s,cr} - n_{s,2}}{\zeta \left[\frac{(X_2 - X_1) - (X_3 - X_1)}{\ln \frac{(X_2 - X_1)}{(X_3 - X_1)}} \right]}$$

X_3 : Taux d'humidité de l'air en équilibre avec le produit séché

- La masse d'air nécessaire au réchauffage initial

$$\sigma_{RP} = \frac{C_{p(RP)}}{C_{p a}} \frac{1}{\zeta} \frac{T_{a,1} - T_{s,0}}{T_{a,1} - T_{s,1}}$$

$T_{s,0}$: Température initiale du produit

$T_{s,1}$: Température du produit en fin de la phase de réchauffage primaire.

- La masse d'air nécessaire au réchauffage du produit pendant la désorption de l'eau liée.

$$\sigma_{RF} = \frac{C_{p(RF)}}{C_{p a}} \frac{1}{\zeta} \frac{T_{a,1} - T_{s,1}}{T_{a,1} - T_{s,3}}$$

La masse totale d'air sec nécessaire au séchage est:

$$\sigma_g = \sigma_L + \sigma_l + \sigma_{RP} + \sigma_{RF}$$

Le débit massique d'air traversant l'appareil est :

$$\dot{m}_a = \sigma_g (1 + X_1) \dot{m}_s$$

La vitesse minimale de fluidisation

$$U_{MF} = Re_{MF} \frac{\mu_g}{d_p \rho_g}$$

La surface de fluidisation est égale à :

$$S = \dot{m}_a \frac{(273 + T_{ae})}{273} \frac{1}{U_F} \frac{1}{\rho_g}$$

$$T_{ae} = \frac{T_{a,3} - T_{a,2}}{\ln \frac{T_{a,3}}{T_{a,2}}}$$

Référence :

Techniques de l'Ingénieur, Séchage Théorie et calculs

İbrahim Dinçer and Calin Zamfirescu, DRYING PHENOMENA THEORY AND APPLICATIONS, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, ON, Canada

https://www.azprocede.fr/Cours_GC/sechage_entrainement.html