

Chapitre III : Cinétique du séchage

III.1 Définition de la cinétique du séchage et les courbes de séchage

III.2 Vitesse de séchage

III.3 Durée de séchage

III.4 Applications (durée et vitesse de séchage)

III.5 Bilans sur les séchoirs

III.6 Application sur les séchoirs

Chapitre III : Cinétique du séchage

III.1 Définition de la cinétique du séchage et les courbes de séchage

La cinétique du séchage est l'étude du comportement global du produit à sécher au cours du temps. Si on considère un produit humide placé dans un courant d'air chaud et sec, l'évolution du produit au cours du séchage est représentée par les courbes suivantes:

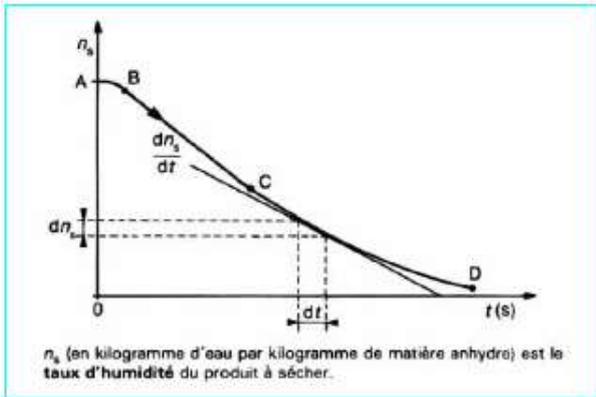


Fig 1 – Courbe de séchage $n_s = X = f(t)$

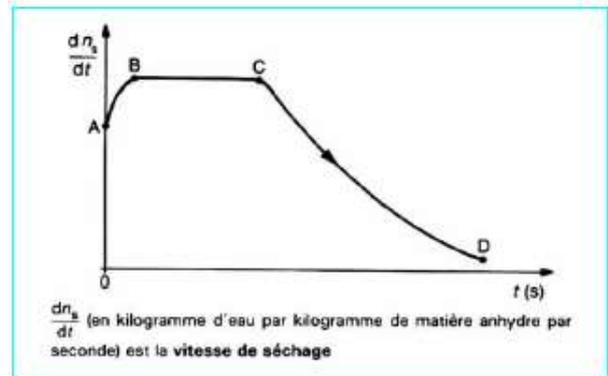


Fig 2– Courbe de séchage $(\frac{dn_s}{dt}) = (\frac{dX}{dt}) = f(t)$

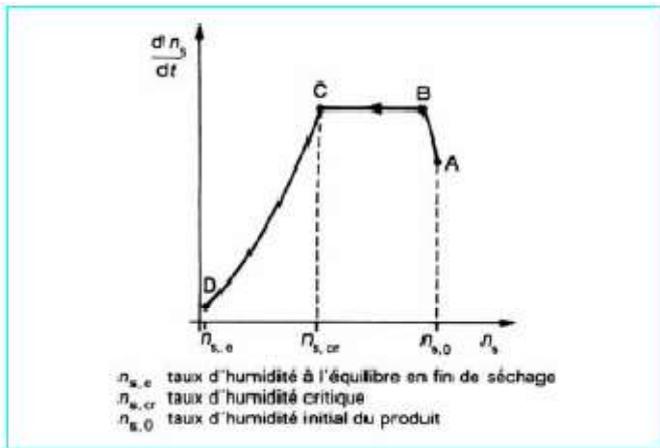


Fig 3– Courbe de séchage : $(\frac{dn_s}{dt}) = (\frac{dX}{dt}) = f(n_s)$

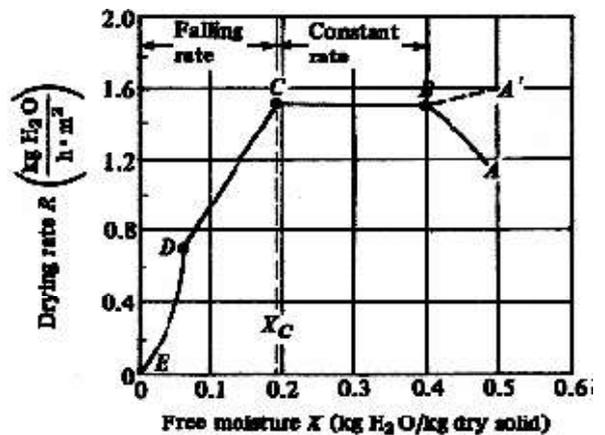


Fig 4– Courbe de séchage : $R = f(X)$

Avec: $n_s = X$: humidité absolue du produit (kg eau/kg produit sec) et dX/dt : vitesse de séchage (kg eau/kg produit.sec) et R : taux de séchage ou flux d'eau évaporée (kg eau/h. m^2). Avec C, le point critique du séchage, qui marque la fin de la période de séchage à vitesse constante (humidité critique X_{cr}).

- ❖ une phase de mise en température du produit (A-B)
- ❖ une phase de séchage à vitesse constante (B-C)
- ❖ une première phase de séchage à vitesse décroissante (C-E)

a) La phase de mise en température (A-B)

La première phase (vitesse de séchage croissante) est courte, éventuellement inexistante. La chaleur de l'air sert surtout à chauffer le produit (T° du produit augmente). L'évaporation augmente progressivement. L'humidité du produit (X) diminue faiblement et la vitesse d'eau évaporée ou la vitesse de séchage (dX/dt) augmente progressivement avec le temps.

b) La phase à allure constante (Phase à vitesse de séchage constante) (B-C)

Le produit est chaud et cède son **eau libre** à vitesse maximale et constante (dX/dt=Cte) en surface du produit, sans cesse renouvelée par de l'eau venant de l'intérieur du produit (en partie similaire au phénomène de transpiration). La température du produit reste constante.

c) La phase à allure décroissante (C-E)

Toute l'eau libre est évaporée. L'extraction de l'eau est plus difficile (**eau de plus en plus liée**) et la vitesse du séchage (dX/dt) diminue.

Les facteurs qui augmentent la cinétique du séchage sont:

- La diminution de l'humidité absolue de l'air de séchage
- L'élévation de la température de l'air de séchage
- L'augmentation du coefficient de transfert thermique par une augmentation de la vitesse de circulation de l'air
- L'augmentation de la surface spécifique du solide ce qui entraîne une augmentation de la surface d'échange

III.2 Vitesse de séchage

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps. L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors:

$$R = - \frac{m_{ps}}{A} \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

Avec : m_{ps} : masse du produit sec

A: Surface du produit à travers laquelle s'opère le transfert d'humidité (m²)

X : humidité absolue du produit (kg eau/kg produit sec).

dX/dt: vitesse de séchage (kg eau/kg produit sec)

R: taux de séchage ou flux d'eau évaporée (kg eau/h. m²)

III.3 Durée de séchage

La durée de séchage est calculée pour deux phases:

- Phase à vitesse de séchage constante

$$t_{BC} = t_{12} = \frac{m_{PS}}{AR_C} (X_1 - X_2) \dots\dots\dots(2)$$

- Phase à vitesse de séchage décroissante

Cas général : $R=aX+b$

$$t_{CD} = t_{12} = \frac{m_{PS}}{A a} \ln \frac{R_1}{R_2} \dots\dots\dots(3)$$

$$a = \frac{(R_1 - R_2)}{(X_1 - X_2)} = \text{pente décroissante}$$

Cas particulier : $R=aX \implies$

$$t_{CD} = t_{12} = \frac{m_{PS}}{A a} \ln \frac{X_c}{X_2}$$

$$a = \frac{R_c}{X_c}$$

\implies Donc la durée totale du séchage est: $t = t_{BC} + t_{CD} \dots\dots\dots(4)$

III.4 Applications (durée et vitesse de séchage)

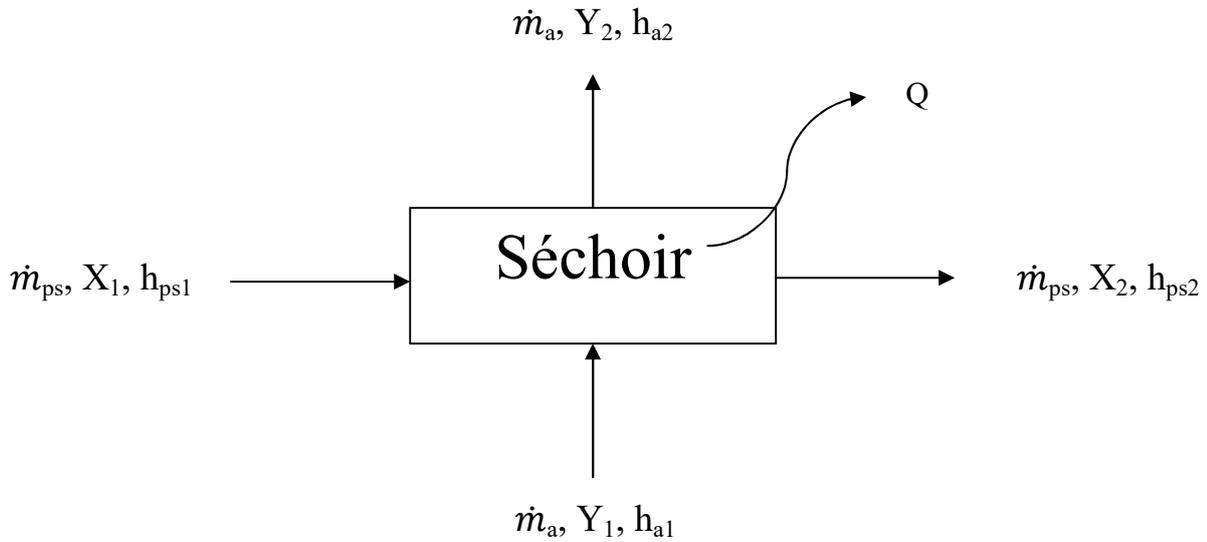
Application 1:

Un solide humide pesant 200 kg avec une surface de séchage de 1.6 m² doit être séché d'une humidité de 40 à 20%. Les essais de séchage ont montré que ce séchage a lieu à un taux constant et que l'humidité critique du solide est de 20%. Le taux de séchage constant est de 3.10⁻² kg / m².min. Le temps de séchage est de valeur: a) 1500, b) 2000, c)1040, d) 500 min.

Application 2:

Un séchoir conçu pour sécher des pommes d'humidité initiale 70 % à une humidité finale de 5%. Les données expérimentales ont montré que l'humidité critique est de 25% et le temps de séchage à taux constant est de 5 minutes. Calculer le temps de séchage total du produit. Supposer que le produit pèse 1kg et de surface d'échange 1m².

III.5 Bilans sur les séchoirs



Avec:

\dot{m}_{ps} : Débit du produit sec (kg ps/s) = $\dot{m}_{ph}/(1+X)$

\dot{m}_{as} : Débit d'air sec (kg as/s)

X_1 : Humidité absolue du produit à l'entrée (kg H₂O/kg ps)

X_2 : Humidité absolue du produit à la sortie (kg H₂O/kg ps)

Y_1 : Humidité absolue de l'air à l'entrée (kg H₂O/kg as)

Y_2 : Humidité absolue de l'air à la sortie (kg H₂O/kg as)

h_a : Enthalpie de l'air (kJ/kg as)

h_p : Enthalpie du produit (kJ/kg ps)

- **Bilan de matière**

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{as} (Y_2 - Y_1) = \dot{m}_{ps} (X_1 - X_2) \dots\dots\dots \text{débit d'eau évaporée}$$

- **Bilan d'énergie**

$$\dot{m}_{as} h_{a1} + \dot{m}_{ps} h_{p1} = \dot{m}_{as} h_{a2} + \dot{m}_{ps} h_{p2} + Q \text{ (pertes thermiques dans le séchoir)}$$

Avec:

$$h_{a1} = 1.005 T_{a1} + Y_1 (2500.5 + 1.884 T_{a1}) \text{ et } h_{a2} = 1.005 T_{a2} + Y_2 (2500.5 + 1.884 T_{a2})$$

$$h_{p1} = C_{pp} T_{p1} + X_1 4.187 T_{p1} \text{ et } h_{p2} = C_{pp} T_{p2} + X_1 4.187 T_{p2}$$

III.6 Application sur les séchoirs

2131.2 kg/h est séché à 4% d'humidité est dans un séchoir par pulvérisation. L'air atmosphérique à 15°C et 0.8% HR est chauffé à 190°C et une humidité absolue $Y_1=0.011$ kgeau/kgas et est évacué à 80 ° C et une humidité absolue $Y_2=0.0534$ kgeau/kgas. La température d'alimentation du lait concentré est de 30°C et d'humidité absolue $X_1=1.22$ kgeau/kgps. Le produit séché sort à 50 ° C. les pertes thermiques du séchoir sont de 105334.71 kJ / h. $C_{pp}=2.35\text{kJ/kg.C}^\circ$, $C_{p\text{ eau}}=4.187\text{kJ/kg C}^\circ$. Calculer:

- Faites le schéma du séchoir
- Le débit du solide sec
- Le débit d'eau évaporé
- Le débit d'air de séchage
- La consommation énergétique du séchoir