

## Méthodes de séchage

- ① Entraînement (convection)
- ② Ébullition (conduction)
- ③ Atomisation
- ④ Rayonnement

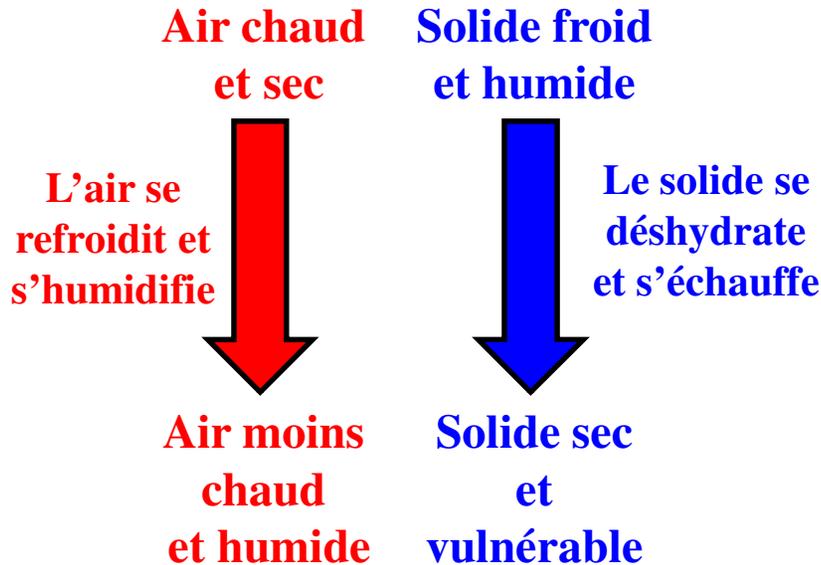
Un liquide ne se vaporise que si sa pression de vapeur est supérieure à la pression à laquelle se trouvent ses vapeurs dans la phase gazeuse

### ① Le séchage par entraînement (convection)

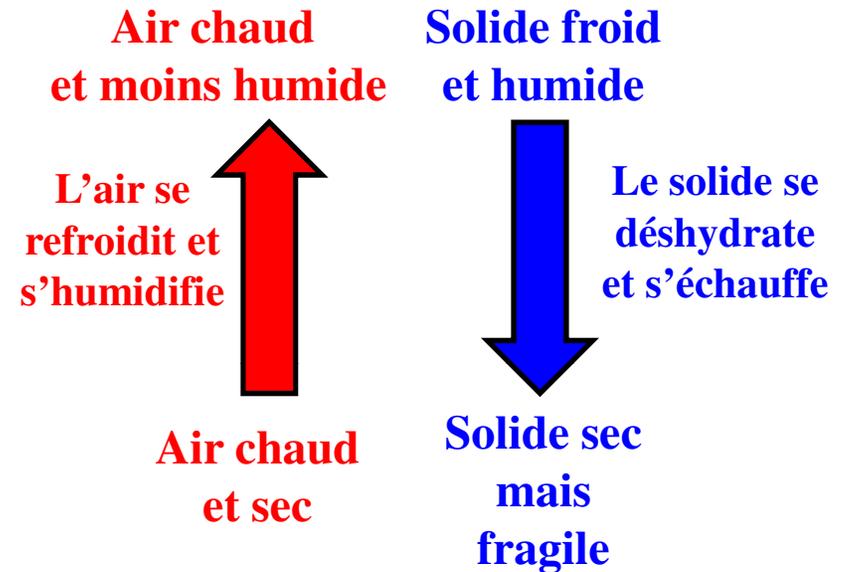
- \* Représente le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique
- \* L'eau – le liquide à éliminer; l'air – le gaz d'entraînement
- \* Réalisation: le solide à sécher en contact avec un courant gazeux chaud (le plus sec possible) – le gaz fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du 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

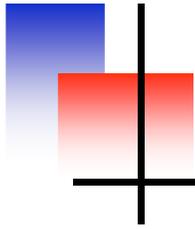


## ② Séchage contre-courant

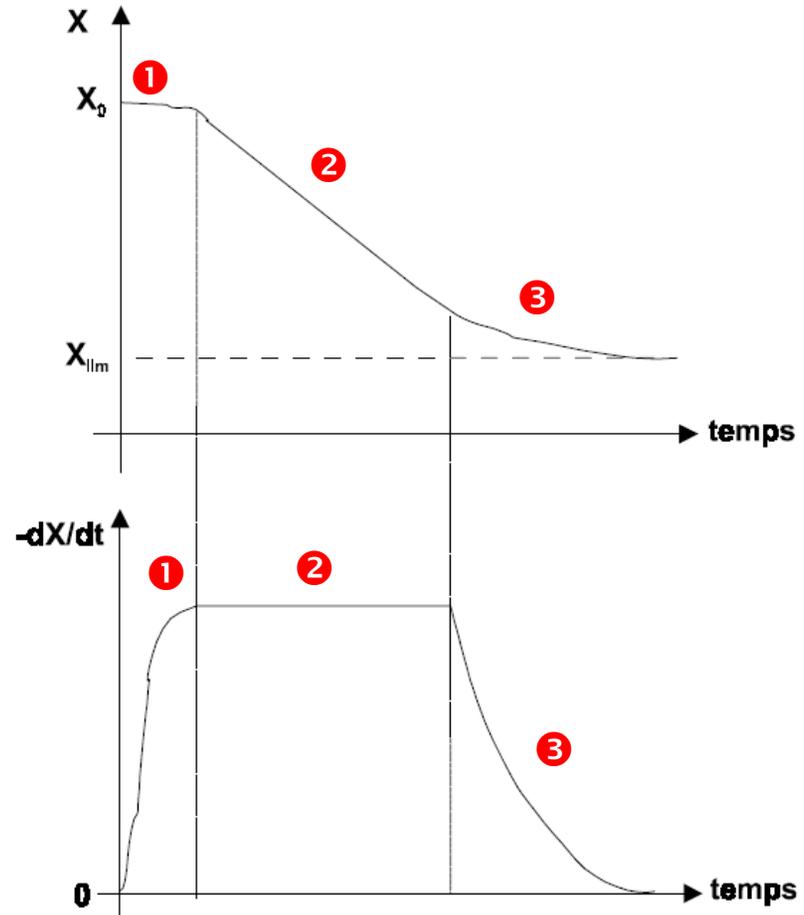


- \* Il faut beaucoup d'air pour déshydrater le produit
- \* Procédé au rendement médiocre

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

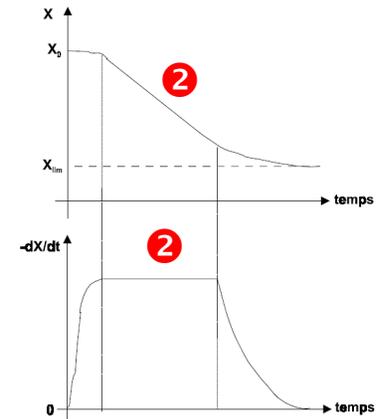


- ① Mise à température du solide
- ② Séchage à vitesse constante
- ③ Séchage à vitesse décroissante

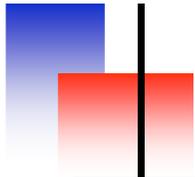




## ② Séchage à vitesse constante



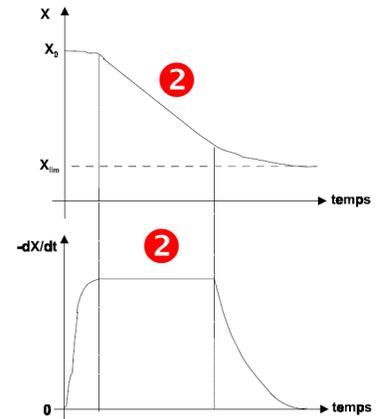
- ✓ S'effectue de manière **adiabatique** – il n'y a aucun échange de chaleur avec l'extérieur
- ✓ La chaleur latente de vaporisation de l'eau est entièrement fournie par le refroidissement de l'air chaud
- ✓ Le processus s'effectue donc à **enthalpie constante** - l'air chaud va donc évoluer sur une isenthalpe
- ✓ Pendant cette période la température du solide reste constante et égale à la température humide de l'air



## ② Séchage à vitesse constante

### ✓ Facteurs qui augment la cinétique

- 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 (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

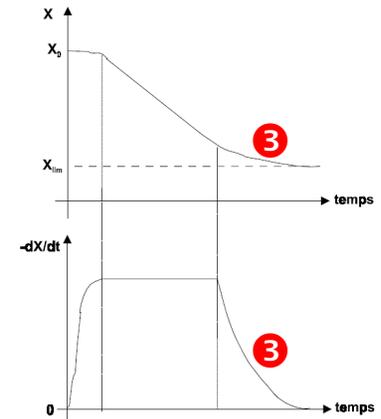


**Pendant cette phase la nature du solide et sa structure interne (pores, interstices) n'interviennent pas**



### ③ Séchage à vitesse décroissante

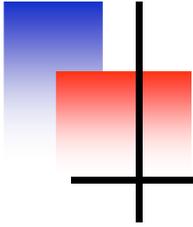
- ✓ L'air n'atteint jamais la **température de saturation adiabatique** puisque la vitesse commence à décroître à partir d'une humidité  $X_c$  (humidité critique) et finit par tendre vers une vitesse nulle
- ✓ L'humidité superficielle n'est plus renouvelée assez rapidement car le séchage progresse, il faut alors éliminer l'eau provenant de l'intérieur du solide
- ✓ La **vitesse s'annule** quand l'humidité du solide devient égale à  $X_{lim}$  ce qui correspond à une **valeur d'équilibre** pour l'air de séchage utilisé
- ✓ Pendant cette phase les conditions opératoires liées à l'air perdent de leur importance - On assiste à un échauffement du solide



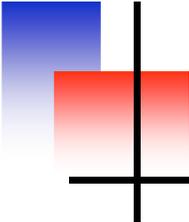
# Séchage par ébullition (conduction)

---

- ❑ 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**)



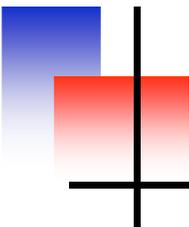
- ❑ Les vapeurs formées sont soit **aspirées** (cas du séchage sous pression réduite qui abaisse la température d'ébullition), soit entraînées par **un gaz de balayage** dont le débit est très faible par rapport à celui utilisé dans le cas d'un chauffage par convection
- ❑ Le séchage sous pression réduite 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 atomisation

---

- ❖ Ce procédé est applicable directement à des **solutions**, des **émulsions** ou des **suspensions fines**
- ❖ L'idée de base - production de poudres qui se propagent très fortement à partir d'un liquide par évaporation du solvant
- ❖ Cette opération est obtenue en mélangeant **un gaz chauffé** à un **liquide atomisé (vaporisé)** de gouttelettes présentant un rapport masse / surface élevé, idéalement de taille égale, au sein d'une cuve (chambre de séchage), provoquant ainsi l'évaporation du solvant de manière uniforme et rapide par contact direct.
- ❖ Ces sécheurs fonctionnent **en continu** et s'appliquent à de grosses productions
- ❖ Ils ont l'inconvénient de nécessiter la vaporisation de très grandes quantités de solvants et consomment donc beaucoup d'énergie ce qui freine leur développement.

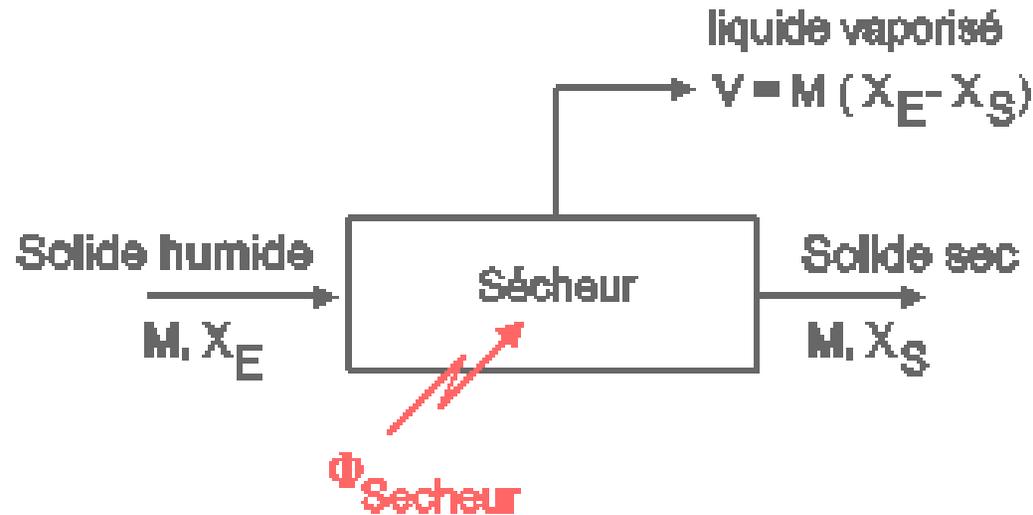


# Séchage par rayonnement

---

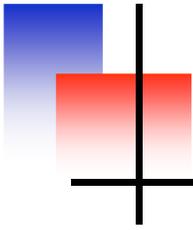
- ❑ Ce mode de séchage convient aux produits en **plaques** ou en **films** (faible épaisseur)
- ❑ L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des **dispositifs électroniques** (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un **émetteur infrarouge**.
- ❑ En infrarouge le chauffage se manifeste sur des épaisseurs très faibles (**500  $\mu\text{m}$** ).
- ❑ Avec des micro-ondes on peut sécher à des épaisseurs plus importantes
- ❑ Le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences excite les molécules d'eau: l'agitation moléculaire qui en résulte provoque des chocs intermoléculaires
- ❑ Cela entraîne un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau
- ❑ Le séchage par micro-ondes est encore peu fréquent dans l'industrie chimique: il présente les avantages d'être propre et facile à réguler. De même son action s'effectue sur le volume du solide ce qui diminue les risques de croûtage en surface.

# Transfert de matière



- ✓ Rapport massique en liquide à l'entrée:  $X_E$
- ✓ Liquide entrant avec le solide:  $M X_E$
- ✓ Solide+liquide entrant:  $M(1+X_E)$
- ✓ Rapport massique en liquide :  $X_S$
- ✓ Liquide sortant avec le solide:  $M X_S$
- ✓ Solide+liquide sortant:  $M(1+X_S)$

$$V = M(X_E - X_S)$$



### Pourcentages : Base humide-base sèche

**Ex: Soit un échantillon de 100 g de panneau mural contenant 90 g de solide et 10 g d'humidité**

$$\% \text{ humidité (base humide)} = \frac{10 \text{ g eau}}{100 \text{ g bois humide}} = 10\%$$

$$\% \text{ humidité (base sèche)} = \frac{10 \text{ g eau}}{90 \text{ g bois sec}} = 11,11\%$$

**En absence d'indication, il s'agit toujours de la base humide**

## Exercice d'application

**On désire sécher 250 kg d'un produit chimique contenant 15 % d'eau (base humide) jusqu'à ce qu'il contienne seulement 3% d'eau (base sèche).**

**Combien d'eau (kg) doit-on enlever?**

**m = 218,875 kg solide**

**Réponse: 31,125 kg H<sub>2</sub>O**

# 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)

$h_{p1}$  = 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)

$M_1$  = teneur en eau du produit à l'entrée (kg eau/kg produit sec)

$M_2$  = teneur en eau du produit à la sortie (kg eau/kg produit sec)

$\dot{m}_{AS}$  = débit d'air sec (kg/s)

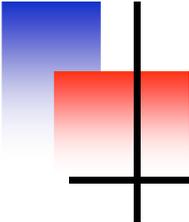
$\dot{m}_s$  = débit de matière sèche à l'entrée (kg m.s/s)

$\dot{m}_{p1}$  = 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 d'application

---

Un sécheur à lit fluidisé à contre-courant déshydrate des levures de boulangerie de 70 % d'eau à 4 %. L'air utilisé à l'entrée a  $T_{a1} = 80 \text{ °C}$  et  $H_1 = 0,01 \text{ kg eau/kgAS}$  et quitte le sécheur à  $T_{a2} = 40 \text{ °C}$ . Le produit à l'entrée est à  $T_{p1} = 20 \text{ °C}$  et il a un débit massique de 1800kg/h; sa chaleur massique est de 3559 J/kg.°C. À la sortie, le produit est à  $T_{p2} = 40 \text{ °C}$  et sa chaleur massique est de 1926 3559 J/kg.°C. Durant le séchage, il n'y a pas de perte de chaleur à travers les parois du sécheur. Calculer le débit d'air sec nécessaire au séchage.