

SÉCHAGE DES SOLIDES

I/ GÉNÉRALITÉS

Le séchage a pour but d'éliminer par vaporisation le liquide qui imprègne un solide.

Il est largement utilisé dans l'industrie chimique où il vient souvent en complément d'opérations comme la sédimentation, la filtration ou l'essorage. Il se pratique dans plusieurs cas:

- le liquide résiduel est incompatible avec la suite du procédé
- le produit humide se conserve mal (hydrolyse possible, modification de l'aspect physique par agglomération des grains)
- le coût du transport est plus élevé en présence de liquide
- le séchage permet outre l'élimination du liquide, la création de modifications de la structure interne du solide soit par exemple l'apparition d'une structure poreuse

A cause du coût énergétique de la vaporisation l'industriel cherche à avoir la plus basse teneur possible en liquide à l'entrée du sécheur. La tendance est à n'utiliser le séchage que lorsque les procédés de séparation mécanique restent impuissants pour atteindre la teneur souhaitée en liquide.

Le champ d'application du séchage est particulièrement large: produits chimiques, produits pharmaceutiques, produits agro-alimentaires, matières plastiques, papiers, bois...

Il se distingue de l'évaporation par les quantités de liquide traité: le liquide d'imprégnation est à une teneur initiale beaucoup plus faible dans le cas du séchage. Les appareils sont donc complètement différents.

Le séchage est une opération unitaire mettant en jeu un transfert de matière (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans une phase gazeuse) et un transfert thermique (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide). La vaporisation pourra s'effectuer par ébullition ou par évaporation.

Dans la suite, sauf précisions particulières, on s'intéressera au séchage dans de l'air des solides imprégnés d'eau. C'est le cas le plus fréquent et il est pratiquement totalement transposable à toutes les autres situations.

On peut signaler que le terme de déshydratation a un sens plus restrictif car il ne s'applique qu'à l'élimination de l'eau. On l'applique également à l'élimination de l'eau de cristallisation des cristaux hydratés. Ce but n'est pas recherché dans une opération de séchage.

III/ CARACTÉRISATION DES GAZ DE SÉCHAGE

1/ Humidité absolue et humidité relative d'un gaz

On définit l'**humidité absolue d'un gaz** comme la masse d'eau en kg associée à 1 kg de gaz sec. On le notera Y .

L'**humidité relative** i s'exprime comme le quotient de la pression partielle de vapeur d'eau p_{H_2O} contenue dans le gaz par la pression de vapeur saturante de la vapeur $P^{\circ}_{H_2O}$ (tension de vapeur) à la même température. L'humidité relative est souvent nommée **degré hygrométrique**.

Quand l'air est saturée en eau, alors $i = 1 \Rightarrow p_{H_2O} = P^{\circ}_{H_2O}$

2/ Point de rosée

Si le mélange initial gaz - vapeur d'eau (exempt de liquide) est refroidi sous une pression totale constante, la pression partielle en vapeur d'eau est constante mais la tension de vapeur diminue (la pression de vapeur saturante de l'eau est une fonction croissante de la température). Quand celle-ci devient égale à la pression partielle, les premières gouttes de liquide apparaissent: on a alors atteint une température nommée le **point de rosée**. L'humidité relative est alors égale à 1.

Une poursuite du refroidissement entraîne une condensation de la vapeur et par suite une diminution de son humidité absolue. L'humidité relative reste constante.

3/ Température sèche et température humide du gaz

On nomme **température sèche** d'un gaz la température indiquée par une sonde de température nue placée dans le courant gazeux. Il s'agit de la température d'un gaz au sens courant.

On nomme **température humide** (ou température de bulbe humide) la température donnée par une sonde enrobée d'une mèche placée dans un courant gazeux et humidifiée en permanence par de l'eau pure. Il faut retenir que la température humide est la température prise par un solide humide durant la phase à vitesse constante d'un séchage par entraînement.

Remarque: Si on considère une enceinte adiabatique traversé par un courant gazeux et contenant de l'eau pure, la température (température sèche) atteinte en sortie par le gaz saturé en vapeur d'eau est nommée **la température de saturation adiabatique**.

4/ Diagramme enthalpique de l'air humide (diagramme de Mollier)

L'enthalpie de l'air humide définit le contenu énergétique de cet air.

L'enthalpie notée H de 1 kg d'air sec associé à Y kg de vapeur d'eau à θ °C est la quantité de chaleur à fournir à ce mélange sous une pression constante pour

3

l'amener de la température de référence 0 °C à la température de θ °C. Les états de référence à considérer sont l'eau liquide et le gaz sec à 0°C.

L'enthalpie de l'air humide H est la somme de l'enthalpie de l'air et de l'enthalpie de l'eau.

$$H = c_{p_a} \cdot \theta + Y \cdot (L_v + c_{p_e} \cdot \theta)$$

où c_{p_a} et c_{p_e} sont respectivement les chaleurs massiques de l'air et de l'eau à l'état gazeux et L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C.

On obtient donc $H = 1,01 \cdot \theta + Y \cdot (2494 + 1,92 \cdot \theta)$ avec H en kJ.kg^{-1}

Le diagramme de Mollier permet la représentation de 5 grandeurs décrivant l'air humide (2 grandeurs suffisent à le définir totalement).

Pour le diagramme utilisable pour des températures sèches jusqu'à 300 °C, on observe notamment les variables suivantes:

- température sèche θ : les isothermes sont des droites légèrement croissantes en fonction de l'humidité absolue avec graduations sur l'axe des ordonnées
- température humide
- humidité absolue Y : les lignes d'humidité absolue constantes sont des verticales avec graduations sur l'axe des abscisses
- humidité relative i : courbes croissantes en fonction de Y
- enthalpie H : les isenthalpes sont des droites parallèles décroissantes

Pour le diagramme utilisable pour des températures sèches jusqu'à 55 °C, on peut également lire la température humide de l'air.

Les diagrammes de l'air humide sont utilisés pour les calculs relatifs aux humidités de l'air, pour les déterminations de points de rosée et de température humide ainsi que pour les calculs énergétiques relatifs au séchage.

III/ CARACTÉRISATION DES SOLIDES HUMIDES

1/ Humidité d'un solide

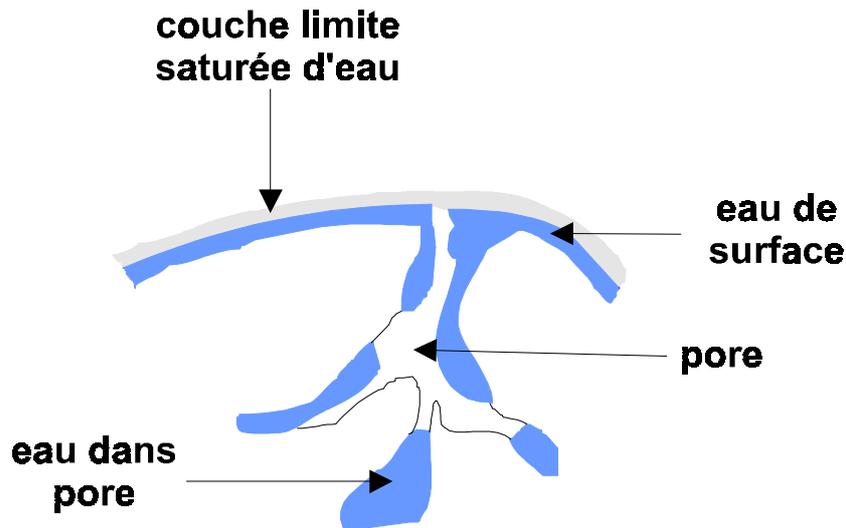
On définit l'**humidité d'un solide** comme la masse d'eau en kg associée à 1 kg de solide sec (c'est en fait l'expression d'un rapport massique). On utilise fréquemment des pourcentages.

2/ Description du solide humide

Avant le séchage un solide humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure suivante. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles. Une couche limite à la périphérie du solide est constituée par de l'air saturé en eau, c'est à dire de l'air contenant de la vapeur d'eau

à une pression partielle égale à la tension de vapeur d'une eau qui serait seule présente dans une enceinte, à la même température. C'est la valeur maximale que peut prendre la tension de vapeur de l'eau à cette température.

L'eau peut aussi se retrouver localisée à la surface ou au fond des pores: les forces qui la retiennent sont alors beaucoup plus fortes et ont trait à des phénomènes complexes de capillarité. Plus les pores sont de petites tailles, plus ces forces sont intenses.



3/ Hygroscopicité

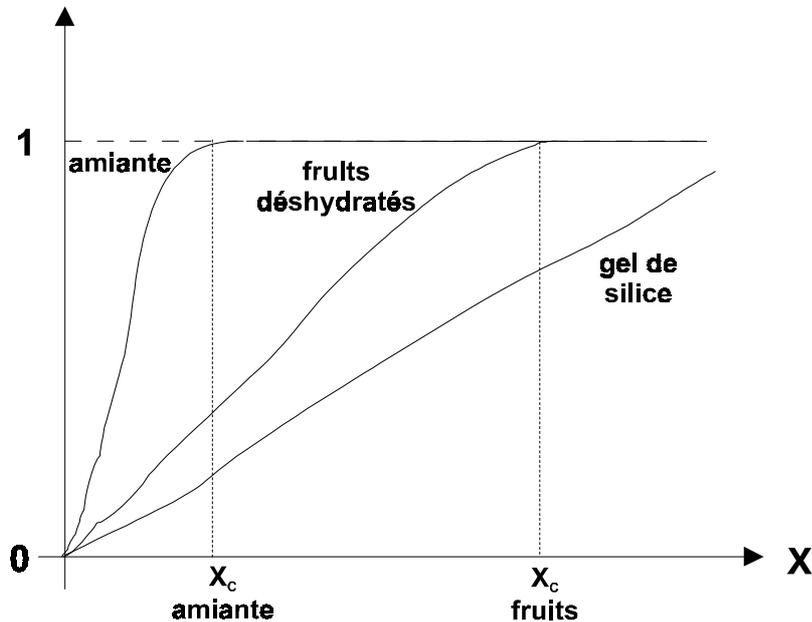
Un solide non hygroscopique est un solide pour lequel à l'équilibre la tension de vapeur du liquide l'imprégnant est maximale pour une température donnée (tension de vapeur "normale" du liquide si il était seul dans une enceinte). C'est le cas durant le séchage des solides qui possèdent un film d'eau superficiel ou des solides dont les interstices sont suffisamment gros pour permettre la diffusion assez rapide de l'eau des pores à la surface.

Un solide devient **hygroscopique** quand l'eau qu'il contient est en équilibre avec un air dont la pression partielle en eau est inférieure à la tension de vapeur maximale pour la température considérée. L'humidité relative de cet air est alors inférieure à 1. Ce comportement est du principalement aux forces liées à la capillarité qui ont tendance "à retenir l'eau en phase liquide".

Le tracé des isothermes d'adsorption permet de rendre compte de ce comportement. On trace expérimentalement à une température donnée la courbe d'équilibre de l'humidité relative de l'air au contact du solide humide en fonction de l'humidité de ce solide.

Plusieurs exemples de produits sont donnés sur la figure suivante. On s'aperçoit qu'en réalité tous les solides ont une certaine hygroscopicité. En dessous d'une humidité relative du solide inférieure à X_c , on observe que le solide humide est en équilibre avec un air non saturé en eau (humidité relative inférieure à 1). Bien entendu dans le cas de composés comme l'amiante, l'hygroscopicité est négligeable.

Par contre elle est marquée pour des solides poreux, des gels, des produits alimentaires déshydratés ...

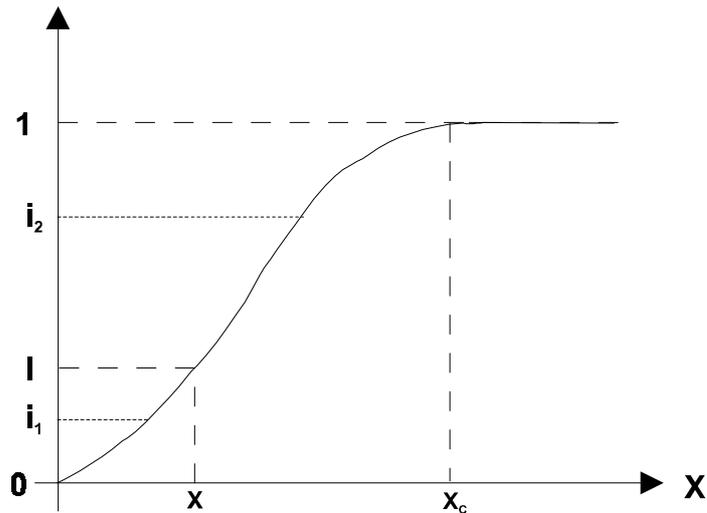


Remarque: si on trace l'isotherme à une température plus élevée, pour une même humidité relative de l'air, l'humidité du produit diminue; ceci est dû au caractère exothermique de l'adsorption.

4/ Comportement d'un solide humide dans de l'air

a/ Séchage et mouillage d'un solide

On note X_c l'humidité d'un solide en équilibre avec de l'air saturé ($i=1$) à la limite du domaine d'hygroscopicité. On considère ce solide d'humidité $X < X_c$ placé dans des courants d'air d'humidités relatives i_1 et i_2 . A cette humidité X correspond une humidité relative de l'air à l'équilibre égale à I . On examine sur l'isotherme de la figure suivante les différents transferts d'eau possibles entre le solide et le courant d'air suivant les valeurs respectives de l'humidité relative de l'air et de l'humidité du solide.



On observe les deux comportements suivants:

$i_1 < I \Rightarrow$ désorption de l'eau donc séchage

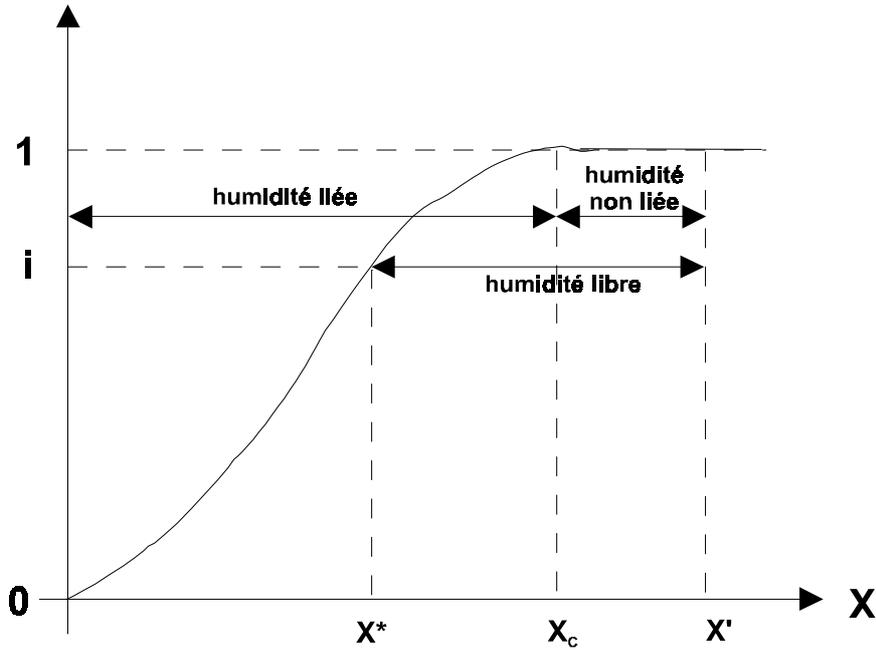
$i_2 > I \Rightarrow$ adsorption de l'eau donc mouillage du solide

remarque: on en déduit qu'un solide dans le domaine hygroscopique placé dans de l'air humide va absorber de l'eau jusqu'au moment où son humidité correspondra à l'équilibre avec l'air. La conséquence de ceci est que le stockage de composés hygroscopiques peut entraîner la formation d'agglomérats de solide dus à l'adsorption d'eau.

b/ Les différentes humidités d'un solide

Si un solide d'humidité $X' > X^*$ est soumis à un courant gazeux constant d'humidité relative i , il perd de l'eau jusqu'à ce que son humidité devienne égale à X^* (humidité du solide correspondant à l'équilibre avec l'air). Même en prolongeant le passage du courant gazeux on ne peut sécher plus et descendre en dessous de X^* . L'intervalle $X' - X^*$ correspond à l'**humidité libre** c'est à dire à l'humidité susceptible d'être enlevée au solide placé dans de l'air d'humidité relative i .

On distingue l'humidité liée ($X < X_c$) et l'humidité non liée ($X > X_c$) : l'humidité liée correspond au domaine hygroscopique du solide.



IV MÉTHODES DE SÉCHAGE

1/ Séchage par convection

a/ Généralités

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique: on envoie sur la matière à sécher un courant gazeux chaud (le plus sec possible) qui 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.

Dans un procédé en continu deux sens de circulation sont possibles pour le gaz et le solide à sécher. La circulation à contre-courant est toujours la plus efficace et permet un séchage plus poussé. L'inconvénient est par contre de mettre en présence à une extrémité du sécheur le gaz à sa température la plus élevée (le moins humide) avec du solide ayant l'humidité la plus faible. Le risque de détérioration du produit est donc important pour un produit thermosensible. Par contre pour un séchage à co-courant le séchage est le plus intense quand le gaz chaud est en contact avec le solide ayant l'humidité la plus forte: le risque d'altération du produit diminue alors fortement.

b/ Processus

Si on considère un solide humide placé dans un courant d'air gazeux on observe au cours de l'opération de séchage trois périodes distinctes:

8

- une phase de mise en température du solide
- une phase de séchage à vitesse constante
- une phase de séchage à vitesse décroissante

⇒ L'étude de la phase à vitesse constante montre que cette phase est comparable à ce que serait l'évaporation d'eau si aucun solide n'était présent: on se trouve dans le cas où soit il y a beaucoup d'eau à la surface du solide soit la diffusion de l'eau de l'intérieur du solide vers la surface est suffisamment rapide.

Durant cette phase on considère que le séchage s'effectue de manière adiabatique car 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 dans le diagramme de l'air humide va donc évoluer sur une isenthalpe (droite de saturation adiabatique): la chaleur perdue par refroidissement est entièrement compensée par l'apport de l'enthalpie de la vapeur d'eau composée d'un terme dû à sa formation par évaporation et d'un terme beaucoup plus faible dû à son réchauffement (l'échauffement du solide est négligeable dans cette phase si les températures de l'air ne sont pas trop élevées).

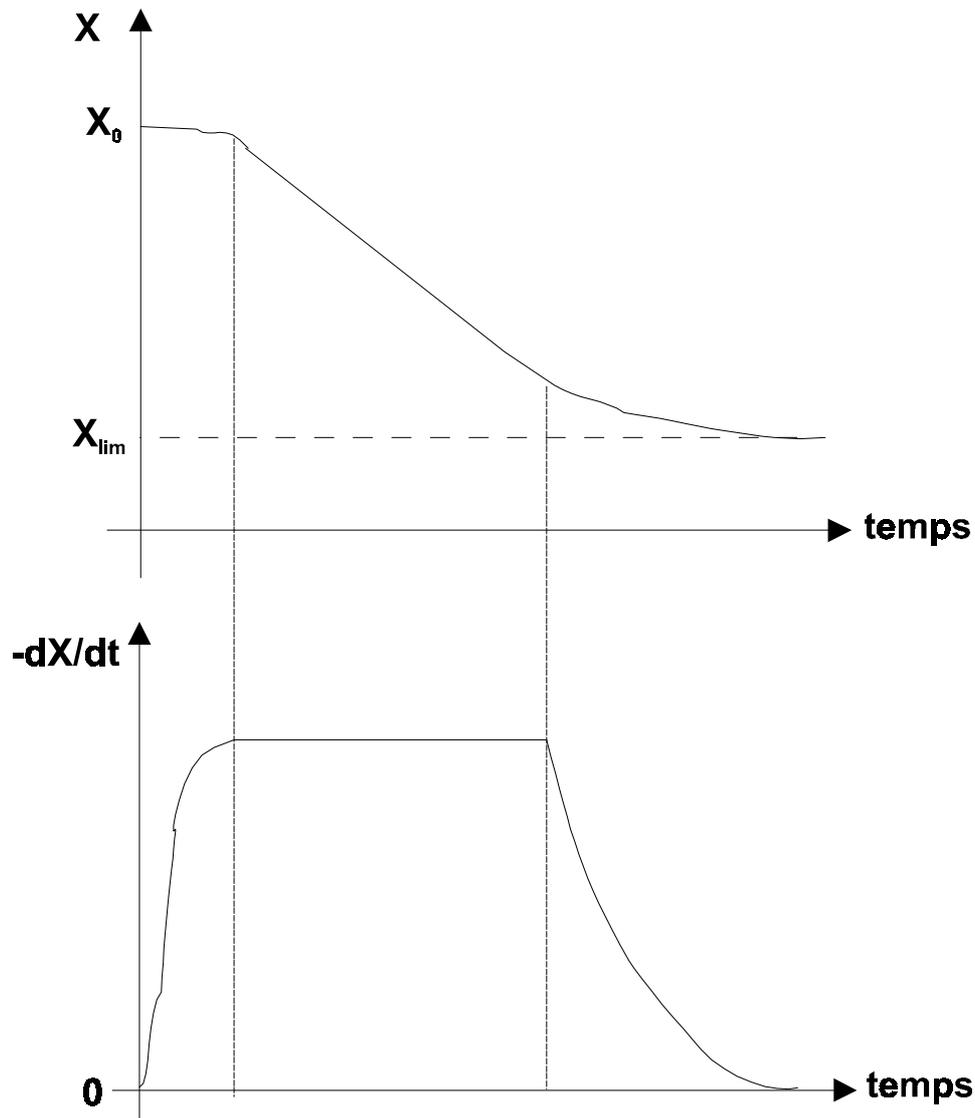
Pendant cette période **la température du solide reste constante et égale à la température humide de l'air.**

Remarque: On montre que dans le cas de l'eau, la température humide est égale à la température de saturation adiabatique de l'air.

Les facteurs qui augmentent la cinétique 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

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



⇒ En fait 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. Pendant cette période la tension de vapeur du liquide imprégnant le solide est inférieure à celle existant pour un liquide seul présent.

L'humidité superficielle n'est plus renouvelée assez rapidement car le séchage progressant, il faut alors éliminer l'eau provenant de l'intérieur du solide: le trajet de la vapeur d'eau vers la surface devient de plus en plus long et les phénomènes de diffusion deviennent cette fois limitant. Cette diffusion devient d'autant plus lente qu'un phénomène de croûtage apparaît parfois en surface. 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.

2/ Séchage par conduction

a/ Généralités

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeurs d'eau...). La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher: le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition si il atteint sa température d'ébullition.

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. La couche de solide en contact avec la paroi est d'abord séchée puis il y a ensuite une augmentation de l'épaisseur de la couche sèche en cours d'opération.

Ce type de séchage est intéressant quand on souhaite récupérer le solvant évaporé pour le récupérer (pour le recycler ou pour éviter le rejet d'effluents polluants). En effet la condensation d'un solvant est toujours beaucoup plus facile quand il n'est pas mélangé à un gaz.

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.

b/ Processus

On retrouve comme pour le séchage par convection deux périodes dans le cas d'un séchage discontinu:

- dans un premier période la vitesse de séchage est constante; la transmission de chaleur par conduction est alors suffisamment rapide pour compenser la chaleur perdue par la vaporisation du liquide.
- dans une seconde période la vitesse de séchage ralentit. Le séchage ayant progressé, l'humidité du solide diminue ce qui provoque aussi une diminution de la tension de vapeur du liquide imprégnant le solide (elle devient inférieure à celle de l'air saturé). Dans ces conditions la température d'ébullition augmente ce qui diminue la vitesse de séchage pour un apport de chaleur constant par conduction. De plus le coefficient de transfert dans le solide devient de plus en plus faible car l'épaisseur de la couche sèche augmente.

3/ Séchage par rayonnement

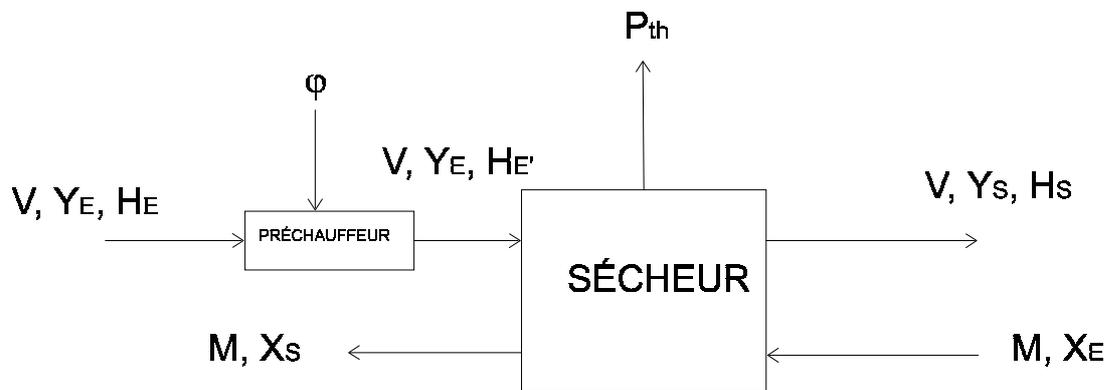
Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques

généralisées 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 μm). 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.

V/ BILANS



Les notations suivantes sont utilisées:

- V : débit massique de gaz sec
- M : débit massique de solide sec
- X : humidité du solide
- Y : humidité absolue de l'air
- H : enthalpie de l'air humide

On considère un procédé continu par convection où un produit d'humidité X_E à l'entrée du sécheur est séché par un air d'humidité absolue Y_E à l'entrée du préchauffeur. Le préchauffeur sert à augmenter la température de l'air avant son entrée dans le sécheur. Il faut remarquer que ce préchauffage ne modifie pas l'humidité absolue de l'air.

Le bilan matière sur l'eau permet notamment de déterminer le débit d'air sec permettant d'éliminer 1 kg d'eau:

$$M \cdot X_E + V \cdot Y_E = M \cdot X_S + V \cdot Y_S$$

donc si on note W le débit massique d'eau évaporée, on obtient:

$$M \cdot (X_E - X_S) = V \cdot (Y_S - Y_E) = W$$

Ceci revient à dire que l'eau enlevée à la matière à sécher a été éliminée par l'air.

D'où pour éliminer 1 kg d'eau, il faut utiliser $\frac{1}{Y_S - Y_E}$ kg d'air sec et 1 kg d'air sec permet l'élimination de $Y_S - Y_E$ kg d'eau.

Le bilan thermique est plus délicat et nécessite l'utilisation des enthalpies; on considère dans ce cas comme système le préchauffeur et le sécheur. On prend en compte comme "débits enthalpiques" d'entrée les enthalpies relatives aux entrées du solide "humide" et du gaz "sec", la puissance thermique fournie par le préchauffeur ϕ et comme "débits enthalpiques" de sortie les enthalpies relatives aux sorties du solide "sec" et du gaz "humide", la puissance thermique dissipée par pertes thermiques P_{th} .

Un cas d'étude intéressant concerne le séchage par convection dans la phase de vitesse constante. Si on se place dans l'hypothèse d'un processus adiabatique, on admet alors qu'il n'y a pas de pertes thermiques et que le solide ne subit aucune variation de température entre l'entrée et la sortie du sécheur. Dans ce cas, la phase dans le sécheur proprement dit est adiabatique et le seul apport d'énergie est la puissance thermique au préchauffeur ϕ qui permet la vaporisation d'un débit massique d'eau W . L'air humide "évoluant" sur une isenthalpe pendant ce séchage, on a:

$$H_S = H_{E'}$$

On en déduit: $\phi = V \cdot (H_{E'} - H_E)$

Dans ce cas la chaleur à fournir au préchauffeur pour vaporiser 1 kg d'eau est:

$$\Phi = \frac{H_{E'} - H_E}{Y_S - Y_E}$$

VI/ APPAREILLAGE

La classification des appareils peut s'effectuer suivant le procédé (continu, discontinu), le mode de séchage (convection, conduction, rayonnement, lyophilisation), ou le type de produits traités (solides en blocs, poudre, pâte, pulpe, film...).

On signalera que l'utilisation d'un procédé continu se fera préférentiellement dans le cas d'une fabrication importante. Les sécheurs discontinus présentent l'inconvénient majeur d'entraîner un coût énergétique supplémentaire à chaque fin de cycle.

1/ Séchage par conduction

Les étuves constituent un exemple de sécheurs en discontinu: elles conviennent pour de faibles quantités ou pour des produits coûteux exigeant des conditions de séchage très particulières.

On peut donner deux exemples de sécheurs continus:

- les sécheurs à tambour rotatif: ils sont constitués par un long cylindre légèrement incliné tournant à l'intérieur d'une enceinte chauffée par des gaz de combustion d'un brûleur. Le solide descend sous l'action de la gravité et de l'entraînement. Le mouvement de rotation permet le renouvellement du solide au niveau des surfaces chauffantes. Ils sont très appropriés pour des produits minéraux supportant des températures élevées.
- les sécheurs à cylindres: ils sont constitués de cylindres creux animés d'un lent mouvement de rotation et chauffés à l'intérieur par un fluide caloporteur. La matière à sécher s'écoule entre les cylindres. Ils conviennent pour les produits sous forme de films (textiles, papier, matières plastiques...).

2/ Séchage par convection

On distingue pour les sécheurs discontinus ceux fonctionnant par léchage (courant de gaz parallèle à la matière) et ceux fonctionnant par traversée (courant de gaz perpendiculaire à la matière). Dans les étuves le produit est fixe sur des plateaux (figure 6).

Deux exemples importants de sécheurs continus peuvent être indiqués:

- les sécheurs à tambour rotatif: ils présentent de grandes analogies avec les sécheurs du même type fonctionnant par conduction mais ici l'air chaud est directement en contact avec le produit. Ce séchoir est adapté aux produits pulvérulents non collants.
- les sécheurs à lits fluidisés: ce séchoir convient pour des poudres divisées qui sont placées sur un support poreux. Un courant d'air chaud est soufflé sous la couche de matière et un lit fluidisé s'établit; les échanges thermiques sont alors intenses et l'efficacité du séchage est très grande.

3/ Séchage par atomisation

Ce procédé est applicable directement à des solutions, des émulsions ou des suspensions fines. Il permet notamment de regrouper en une seule opération la suite d'opérations de cristallisation, de filtration et d'essorage.

Le système de pulvérisation en très fines gouttelettes du liquide préchauffé conditionne l'efficacité du séchage. Il est constitué d'une turbine tournant à grande vitesse. L'air est introduit chaud par un disperseur dans la chambre. Pendant son trajet dans l'appareil, toute l'eau est évaporée par l'air.

Ces sècheurs 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. Beaucoup de produits peuvent être séchés par ce procédé:

- produits minéraux (pigments, engrais...)
- produits organiques (colorants, polymères, produits pharmaceutiques...)
- produits alimentaires
- lessives

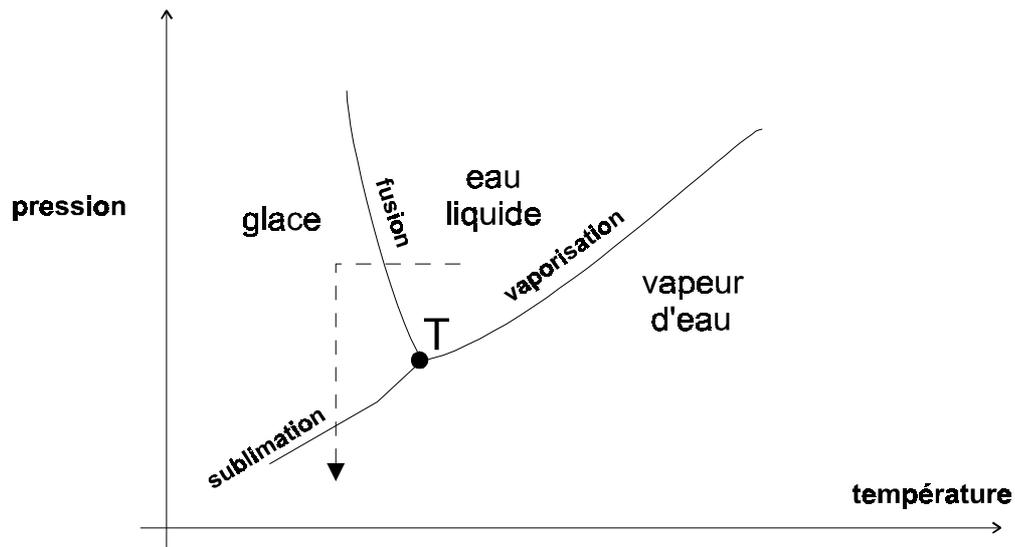
4/ Séchage par lyophilisation

Certains produits alimentaires ou pharmaceutiques d'origine animale ou végétale doivent être déshydratés pour le stockage et le transport. Le séchage par un procédé classique entraîne la migration des composés solubles de l'intérieur des cellules vers la périphérie des produits en même temps que l'évaporation de l'eau. Cette concentration des composés solubles à la périphérie provoque une redissolution sélective à la réhydratation et donc une dégradation de la qualité des produits. De plus les composés naturels ne supportent parfois aucun apport de chaleur sous peine d'être détruits (vitamines). La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace sans passer par la phase liquide.

Le procédé peut être expliqué sur la figure suivante. On refroidit la substance à des températures de l'ordre de -10 à -40 °C très rapidement pour obtenir des cristaux de glace de petite taille (la sublimation suivante est alors facilitée). On abaisse ensuite la pression en dessous du point triple (entre 100 et 10 pascals) de façon à permettre la sublimation de cristaux: on évite ainsi la formation d'eau liquide intermédiaire. La sublimation se poursuit jusqu'au produit sec tant qu'on maintient une pression suffisamment faible au-dessus du produit.

La récupération de la vapeur d'eau s'effectue soit par condensation sur une paroi refroidie à -40 °C avec formation de glace et élimination de celle-ci par un racloir, soit par action d'un déshydratant (P_2O_5 , $CaCl_2$...). L'aspiration des vapeurs par la pompe à vide est impossible en raison de l'énorme volume de la vapeur d'eau dégagée sous ces pressions; la pompe à vide n'élimine donc que les incondensables.

La lyophilisation est un procédé coûteux (production des frigories, utilisation du vide) qui est donc réservé à des produits alimentaires ou particulièrement onéreux: jus de fruits, lait, plasma sanguin, antibiotiques...



VII/ ÉQUIPEMENTS ANNEXES DES SÉCHEURS

1/ *Filtres*

Suivant le produit à traiter des contraintes importantes peuvent être imposées à l'air de séchage. Des filtres sont donc souvent installés; ils peuvent parvenir parfois à empêcher le passage des bactéries et autres micro-organismes si ils sont suffisamment fins.

2/ *Ventilateurs*

Ils communiquent à l'air l'énergie mécanique nécessaire à sa traversée du sécheur.

3/ *Déshumidificateurs de l'air*

Pour améliorer la capacité d'absorption d'eau de l'air, il est intéressant de prévoir un dispositif de déshumidification de l'air qui abaisse l'humidité de l'air avant son entrée dans le sécheur.

On peut procéder par condensation en diminuant la température de l'air en dessous de son point de rosée ce qui permet d'éliminer l'eau en excès. On peut aussi passer l'air sur un support hydrophile qu'on régénère ensuite. Cette deuxième méthode est plus fréquemment utilisée pour déshumidifier l'air de refroidissement des produits après séchage.

4/ Réchauffeurs d'air

La nécessité d'abaisser l'humidité relative de l'air avant son entrée dans le sécheur pour obtenir une meilleure efficacité oblige à préchauffer l'air. On utilise à cet effet des aérothermes constitués par des tubes munis d'ailettes et traversés par des fluides caloporteurs.

Une deuxième solution consiste à utiliser des brûleurs utilisant des combustibles divers (fuel, charbon, gaz). Si le contact de l'air avec les produits de combustion est direct le rendement thermique est meilleur mais il faut alors ne pas avoir de contraintes au niveau de la contamination par les dérivés de combustion du produit à sécher. Pour éviter ce problème, on réchauffe alors l'air en utilisant un échangeur.

5/ Récupération thermique

Le recyclage de l'air en sortie du sécheur peut s'effectuer si il est encore peu chargé en humidité. On renvoie donc cet air mélangé à de l'air "neuf" au niveau du préchauffage. Il est aussi parfaitement possible d'utiliser l'air en sortie souvent encore à une température élevée pour contribuer en partie au préchauffage de l'air "neuf".

VII/ PROBLÈMES GÉNÉRÉS PAR LE SÉCHAGE

1/ Risques d'explosion

Le sécheur est un appareil dangereux si le solvant est un composé organique car il met en présence des vapeurs organiques et des poussières organiques avec le dioxygène de l'air.

Une explosion ne peut avoir lieu qu'en présence de facteurs déterminés:

- dioxygène en quantité suffisante: on considère généralement qu'en dessous de 7 % il n'y a plus de risques sérieux.
- présence d'une source d'ignition qui va fournir l'énergie minimale d'inflammation: paroi chaude, choc, étincelle électrostatique...
- présence d'un comburant organique:
 - ◇ s'il est sous forme de vapeurs il faut que la concentration soit inférieure à la limite inférieure d'explosivité définie en fonction de la teneur en dioxygène de l'air.
 - ◇ s'il est sous forme de poussières, le risque devient très important pour des poussières de taille inférieures à 100 µm. Le risque dépend également de la concentration en poussières.

L'accent est mis sur les moyens curatifs de protection (résistance mécanique améliorée de l'ensemble des constituants du sécheur, présence de disques de ruptures communiquant avec l'extérieur par un conduit de gros diamètre...) mais aussi sur les moyens préventifs. On peut dans ce but installer des mises à la terre, des liaisons équipotentielles entre les parties métalliques mais il faut surtout se placer dans des conditions minimisant les risques de se trouver dans la zone d'explosivité. L'utilisation d'un courant d'azote dans le sécheur permet de diminuer la concentration en dioxygène. Dans le cas d'un séchage par conduction sous pression réduite, les vapeurs sont essentiellement formées du solvant: on s'attachera donc à éviter des entrées d'air dans le sécheur.

2/ Protection de l'environnement

L'air rejeté à la sortie doit respecter les normes de rejet en vigueur. Il faut donc notamment dans le cas de l'évaporation d'un solvant organique récupérer le solvant. Les poussières de solide entraînées avec le gaz ne doivent pas dépasser une certaine concentration: on utilise donc des appareils pour le dépoussiérage des gaz (cyclones, filtres à manches, colonnes de lavage...).

BIBLIOGRAPHIE

On pourra consulter les ouvrages suivants dont certaines figures ont été adaptées:

- Technologie Génie Chimique (ANGLARET - KAZMIERCZAK) Tomes 2 et 3
- Techniques de l'ingénieur: articles relatifs au séchage
- Les opérations unitaires du génie chimique, M. LONCIN, DUNOD (51)

Le diagramme d'air humide utilisé se trouve dans les Techniques de l'ingénieur.