

III.1. Généralités

Le séchage est une opération unitaire qui a pour but d'éliminer par vaporisation l'eau qui imprègne un produit (liquide ou solide) afin de le transformer en produit solide sec dont l'humidité résiduelle est très faible.

Le séchage se distingue de l'évapo-concentration qui ne traite que les produits liquides très humides (exemple : lait). Les produits liquides qu'on veut sécher (poudre de lait) sont d'ailleurs toujours préconcentrés aux préalables par évapo-concentration qui est une technique de déshydratation moins coûteuse en énergie que le séchage.

III.1.1. Objectifs

Le séchage est largement utilisé dans l'industrie alimentaire où il vient souvent en complément d'opérations comme l'évapo-concentration, la décantation, la filtration ou l'essorage. Il se pratique dans plusieurs cas :

- L'humidité résiduelle 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 d'eau

Le séchage permet outre l'élimination d'eau, la création de modifications de la structure interne du solide comme par exemple l'apparition d'une structure poreuse.

A cause du coût énergétique élevé du séchage, l'industriel cherche à avoir la plus basse teneur possible en eau à l'entrée du sécheur. La tendance est à n'utiliser le séchage que lorsque les procédés de séparation mécanique restent impuissants pour atteindre l'humidité résiduelle souhaitée. Le séchage des liquides est toujours précédé d'une autre opération de déshydratation moins coûteuse en énergie : l'évapo-concentration.

III.1.2. Description du solide humide

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

Avant le séchage un solide humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure suivante. Le solide a un film d'eau adhérant 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

Exemples de produits :

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage. Le séchage peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. On peut citer par exemple :

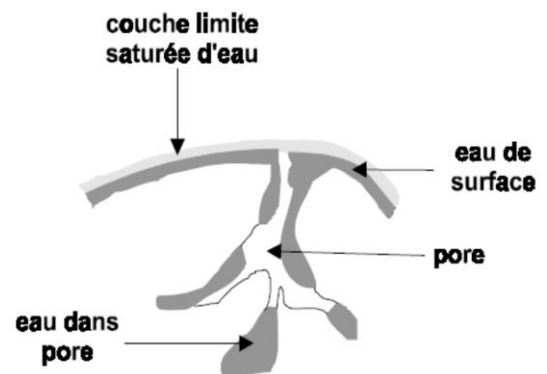
Les pâtes alimentaires

La charcuterie : saucisson, jambon...

Les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée

Les légumes (pois,...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots...)

Certains biscuits apéritifs sont produits par séchage à l'air chaud à partir d'une pâte de maïs Le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché jusqu'à devenir du sel raffiné. La conservation de beaucoup de types de grains ou de végétaux est assurée par le séchage : café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épices...



Certains produits liquides : lait, lactosérum... des coproduits de l'industrie alimentaire souvent destinés à l'alimentation du bétail, ou l'industrie chimique (additifs...) : pulpe de betterave (sucrierie), tourteaux d'oléagineux (huilerie), drèches (brasserie, jus de pomme)...

III.1.2. Les caractéristiques du produit solide

A/ Humidité d'un produit ou teneur en eau (notée X ou Hp)

On définit l'humidité d'un produit ou teneur en eau comme la masse d'eau que contient le produit. On utilise fréquemment des pourcentages (%). 2 unités sont possibles (%) :

X ou H_p : en g d'eau / 100g de produit

X ou H_p : en g d'eau / 100g de Matière sèche

On peut aussi calculer la teneur en extrait sec (ES) ou matière sèche (MS) du produit ; ES s'exprime aussi en % : en g de MS / 100 g de produit

B/ l'activité de l'eau

Pendant un séchage, c'est d'abord l'eau libre qui est évaporée ; plus le séchage se poursuit, plus l'eau qui reste dans le produit est difficile à évaporer car elle est de plus en plus liée.

C/ la surface spécifique

Plus la surface de contact avec l'air est importante, plus la capacité évaporatoire sera élevée. On parvient notamment à augmenter ce paramètre en augmentant la surface spécifique (m²/kg) du produit en le fragmentant ou le pulvérisant (spray pour les liquides).

III.1.3. Séchage et stabilité du produit :

- **Le séchage est souvent utilisé pour allonger la durée de vie du produit** ; en effet en même temps qu'on diminue l'humidité résiduelle du produit, on diminue l'eau libre disponible pour les réactions d'altération, c'est-à-dire l'activité de l'eau (a_w) qui diminue en dessous de l'activité minimale de développement des microorganismes (c'est-à-dire a_w<0.7) ; il faut néanmoins souvent descendre à des a_w beaucoup plus faibles afin d'inhiber les réactions d'altération d'origine chimique et enzymatique (oxydation des lipides, réactions de Maillards,...)

- **Le séchage n'est pas une opération de sanitation**, c'est-à-dire que le séchage n'a aucune valeur stérilisatrice ou pasteurisatrice ! Le produit sec n'est donc pas stérile. En effet, même si le produit est séché comme le lait en le mettant en contact avec de l'air chaud et sec à plus de 200°C, jamais la surface du produit n'atteint des températures létales, car l'évaporation intense rafraîchit la surface du produit. Il sera donc nécessaire de bien maîtriser la qualité sanitaire du produit à sécher et surtout de faire précéder l'opération de séchage par une opération de sanitation qui est classiquement la pasteurisation, ou d'ajouter au produit des conservateurs chimiques (sel nitrité en charcuterie, sulfites pour les fruits secs)

III.2. Principes physiques du séchage

Le séchage est une opération unitaire mettant en jeu un transfert de matière (l'eau imprégnant le produit passe à l'état de vapeur et est récupéré par l'air) et un transfert thermique (une fourniture de chaleur permet le changement de phase du liquide).

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour évaporer l'eau d'un produit : l'ébullition ou l'entraînement.

L'idée la plus simple consiste à porter le produit à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. Mais pour obtenir une élimination poussée de l'eau sans altération excessive de la qualité des produits, on préfère bien souvent opérer à température plus basse en utilisant l'air comme gaz d'entraînement. Quel que soit le mode de séchage, c'est la pression de vapeur d'eau dans le produit qui détermine les échanges entre l'air et le produit.

III.2.1. Séchage par ébullition

L'ébullition a lieu lorsque la température du produit est élevée (par conduction sur une surface chaude, par rayonnement, par de la vapeur d'eau surchauffée, par immersion dans de l'huile chaude) à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale à la pression totale ambiante : $p = p_t$
Il découle de cette définition que : la température d'ébullition dépend de la pression totale (elle est plus basse sous vide qu'à pression atmosphérique) et de l'activité de l'eau du produit (elle augmente lorsque a_w diminue).

Le séchage par ébullition est mise en œuvre dans le cas du séchage par conduction, comme le sécheur cylindre (flocons de pomme de terre)

III.2.2. Séchage par entraînement

Lorsqu'un produit humide est placé dans un courant de gaz (air le plus souvent) suffisamment chaud et sec, il s'établit un écart de température et de pression partielle tel que :

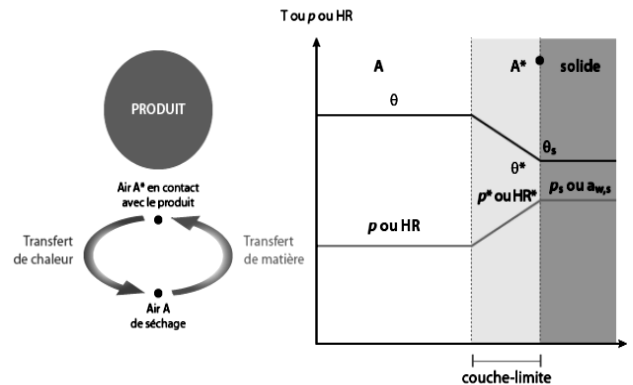
- ✦ l'air apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation ;
- ✦ l'eau est évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par l'air.

Le produit se met spontanément à une température telle que les transferts de chaleur permettent l'évaporation d'un débit d'eau égal à celui capable de traverser la couche limite (compte tenu de ce qu'une petite partie de la chaleur est utilisée à échauffer le produit).

Le séchage par entraînement consiste à placer un corps humide dans un courant d'air (ou autre gaz) suffisamment chaud et sec. Dans ces conditions, il s'établit spontanément entre le corps et le gaz un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

Un transfert de chaleur s'effectue de l'air vers le produit, sous l'effet de la température

Un transfert d'eau s'effectue en sens inverse du fait de la pression partielle d'eau entre l'air et la surface du produit (Figure)



Le séchage par entraînement est le moyen de séchage le plus universel, tous produits et secteurs alimentaires confondus (lait, œuf, charcuterie, céréales et produits végétaux, fruits, etc...).

III.3. Les différents modes de séchage

On rencontre une grande diversité dans les modes de séchage :

III.3.1. Séchage conductif :

Le produit est mis en contact avec des surfaces chaudes (cas du sécheur tambour rotatif) Exemples : le séchage de pommes de terre ou de fruit ou légumes en flocons, de lait, de fécule de pomme terre, d'amidon...

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.

III.3.2. Séchage convectif :

On envoie sur le produit à sécher un courant d'air chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau et entraîne la vapeur formée

Exemples : le séchage de plantes aromatiques, de fruits, de grains, de charcuteries...

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.

III.3.3. Séchage par InfraRouge ou MicroOndes : un rayonnement électromagnétique est appliqué sur le produit. 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 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 nm). 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.

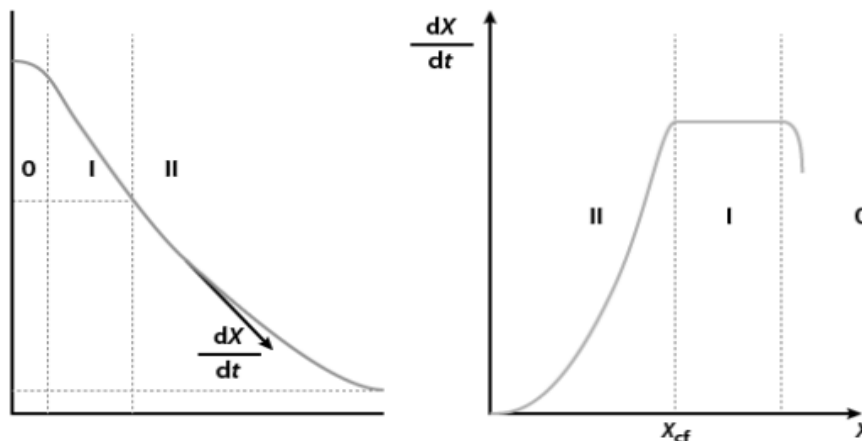
Exemples : le séchage industriel des pâtes alimentaires ; la dessiccation des légumes, des fruits, ...

III.3.4. La lyophilisation : le produit est congelé (en dessous de -20°C) puis amené à très basse pression pour en sublimer (et non évaporer car la glace va passer à l'état vapeur sans passer par l'état liquide) la glace qu'il contient. Les produits de haute valeur ajoutée peuvent être lyophilisés (café soluble, ferments, rations alimentaires pour randonneurs,...) car la technique de lyophilisation est très peu productive et très coûteuse en énergie.

III.4. Etude de la cinétique de séchage

Si on considère un produit humide placé dans un courant d'air chaud et sec, on observe au cours de l'opération de séchage que l'eau s'évapore du produit à différentes vitesses

($C_E = dX/dt$) suivant la figure ci dessous avec trois périodes distinctes :



- une phase de mise en température du produit (0)
- une phase de séchage à vitesse constante (I)
- une phase de séchage à vitesse décroissante (II)

a) La phase de mise en température

La chaleur amenée par l'air sert surtout à réchauffer le produit, mais l'eau s'évapore petit à petit ; L'humidité du produit (X) diminue faiblement et le débit d'eau évaporée ($CE=dX/dt$) augmente progressivement avec le temps.

Remarque : cette phase est négligeable pour les produits fragmentés de petites tailles (poudre, liquide atomisée en spray)

b) La phase à allure constante

Le débit d'eau évaporée (CE) est à son maximum et constant ; c'est l'eau libre qui s'évapore à sa vitesse maximale (CE=cte)

Toute la chaleur amenée par l'air est utilisée pour évaporer l'eau du produit. 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 compensé par l'apport de l'enthalpie de la vapeur d'eau composée d'un terme du à sa formation par évaporation et d'un terme beaucoup plus faible du 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.

c) La phase à allure décroissante

On voit que le débit d'eau évaporée (CE) diminue, car l'eau qui reste est de plus en plus difficile à évaporée (eau de plus en plus liée) ; La température de surface du produit augmente et se rapproche de la température sèche de l'air.

Il faut faire attention à protéger les produits thermosensibles pendant cette phase (augmenter l'humidité de l'air de séchage et baisser la vitesse et la température de l'air pendant cette phase où l'aw est faible...)

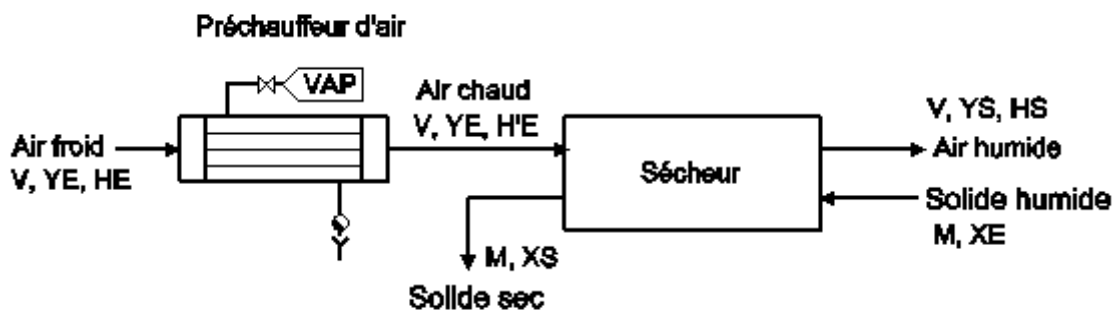
III.5. Bilan sur les séchoirs

On considère un séchoir continu à contre-courant.

La circulation à contre-courant est efficace au niveau énergétique, mais risquée pour les produits thermosensibles, car le produit en fin de séchage (faible a_w) n'est plus protégée par une évaporation intense de l'eau, et la température de surface se rapproche de la température sèche de l'air !

L'air entre à un débit massique (V) avec une humidité absolue (Y_e) et une enthalpie (H_e) ; il est réchauffé (enthalpie $H'_e > H_e$) puis envoyé sur le produit. Il se charge de l'humidité du produit et ressort avec une humidité plus grande (Y_s) et une enthalpie H_s peu différente de l'enthalpie qu'il avait à l'entrée (H_e) car le séchage peut être considéré comme isenthalpique.

Le produit humide entre dans le séchoir à un débit massique (M_e) et une humidité (X_e) ; il ressort sec à un débit plus faible (M_s) avec une humidité résiduelle plus faible (X_s)



III.5.1. Bilan Matière

Permet de déterminer la capacité évaporatoire du séchoir (CE = W) c'est-à-dire le débit d'eau évaporée du produit (en kg ou tonne d'eau par heure)

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 CE le débit massique d'eau évaporée qui est encore appelée capacité évaporatoire du séchoir (CE), on obtient :

$$M \cdot (X_e - X_s) = V \cdot (Y_s - Y_e) = CE$$

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 $1/(Y_S - Y_E)$ kg d'air sec et 1 kg d'air sec permet l'élimination de $(Y_S - Y_E)$ kg d'eau.

III.5.2. Bilan thermique

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 qui permet la vaporisation d'un débit massique d'eau CE. L'air humide « évoluant » sur une isenthalpe pendant ce séchage, on a : $H_S = H_E'$

On en déduit :

$$P = V \cdot (H_E' - H_E)$$

Dans ce cas la chaleur à fournir au préchauffeur pour vaporiser 1 kg d'eau est appelée CES (Consommation Énergétique Spécifique) en KJ/Kg d'eau évaporée) est :

$$CES = (H_E' - H_E) / (Y_S - Y_E)$$

III.5.3. Paramètres influençant la capacité évaporatoire

Nous ne traiterons ici que la technique de séchage par l'air (entraînement) qui est la plus répandue par ailleurs.

On définit la **capacité évaporatoire** d'un séchoir comme étant le débit d'eau qu'il est capable d'enlever au produit. La capacité évaporatoire est donc un débit d'eau évaporée qui s'exprime en kg/h ou tonne/h .

La capacité évaporatoire d'un séchoir va ainsi dépendre des caractéristiques du produit à sécher mais aussi du matériel utilisé et donc des caractéristiques de l'air de séchage.

III.6. Différents dispositifs de séchoirs

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.

III.6.1. les sécheurs à cylindres

Ils sont constitués d'un ou deux cylindres creux animés d'un lent mouvement de rotation et chauffés à l'intérieur par un fluide caloporteur (vapeur).

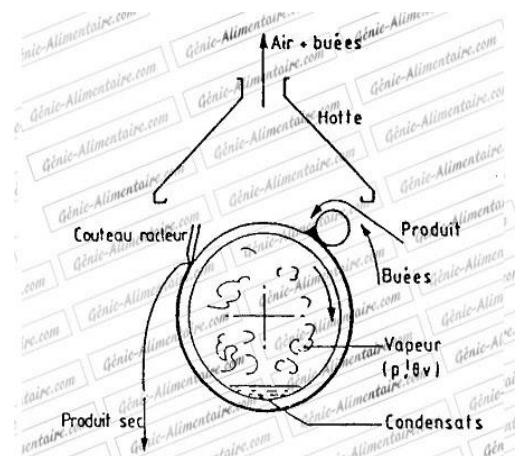
La matière à sécher est déposée à la surface du cylindre et encollée à l'aide de cylindres satellites qui servent aussi à réduire l'épaisseur du produit.

Ils conviennent pour les produits pâteux tels que les fruits & légumes réduits en purée, les liquides concentrés.

Exemple de produits : purée de pomme de terre, purée de fruits ou légumes, fécule de pomme de terre, amidon pré-gélatinisé, lait, baby food,...

Caractéristiques : séchage continu par conduction.

Ce procédé peut être utilisé pour fabriquer de la poudre de lait qui ainsi fabriquée porte le nom de poudre de lait « hatemaker » qui est très apprécié par l'industrie de la chocolaterie, car ce produit a subi un traitement thermique poussé contrairement à la poudre de lait classique dite spray.

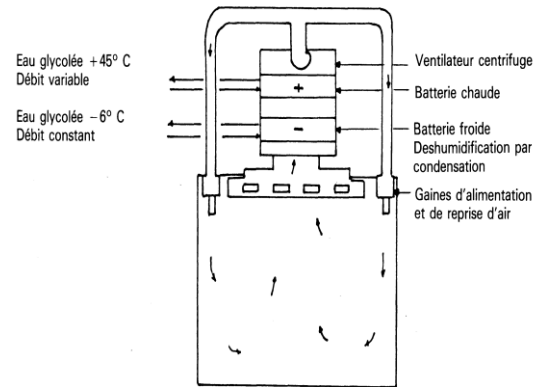


III.6.2. Cellule (ou étuve) de séchage

Le produit est posé ou accroché sur des chariots traversés par le courant d'air chaud et sec qui arrive par des tuyères disposés sur le plafond. L'air usé chargé de l'humidité du produit est repris par le plafond pour être recyclé.

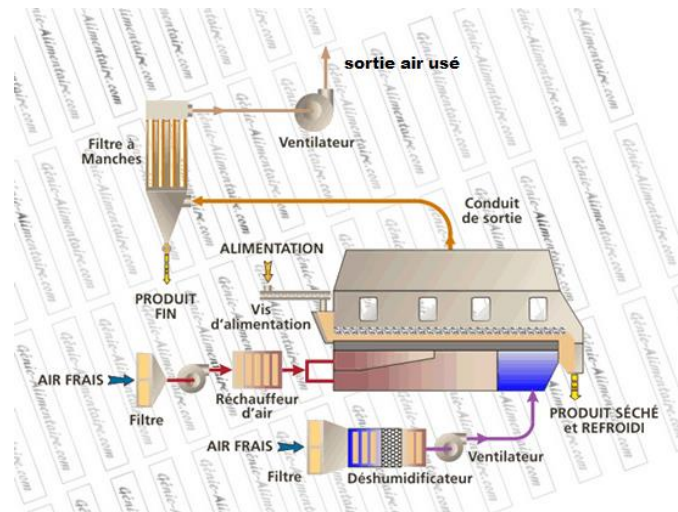
Voir figure ci-dessous qui illustre le cas des cellules de séchage de saucissons ou jambons crus.

Schéma de principe du conditionnement d'air dans les cellules de sèche



III.6.3. Sécheur à lit fluidisé

Ce séchoir convient pour des poudres divisées ou des flocons de céréales qui sont placées sur un support poreux. Un courant d'air chaud et sec est soufflé sous la couche de matière qui est mise en suspension dans le courant d'air, et un lit fluidisé s'établit ; les échanges thermiques sont alors intenses et l'efficacité du séchage est très grande. De plus cela permet d'éviter que les particules ne se collent entre elles !



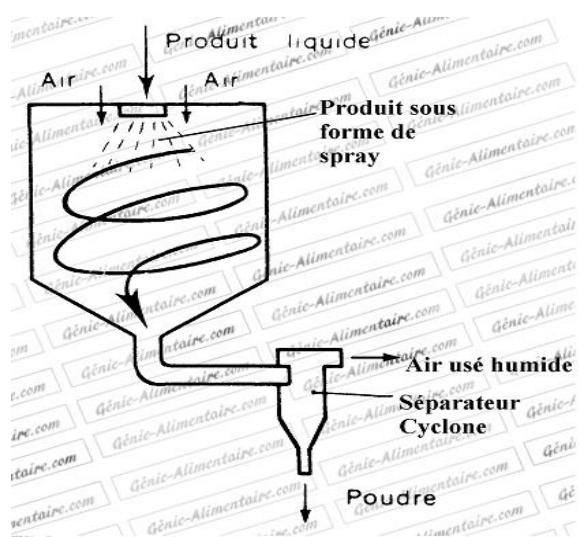
III.6.4. Sécheur par atomisation

Principe : Lors de la déshydratation par atomisation, le liquide est pulvérisé en fines gouttelettes, dans une enceinte cylindrique verticale (appelée tour qui peut atteindre 20 m de hauteur) au contact d'un courant d'air chaud et sec afin d'évaporer l'eau. La poudre obtenue est entraînée par le flux d'air usé jusqu'à un cyclone ou un filtre à manche qui vont séparer l'air de la poudre.

Pulvérisation (ou atomisation) : Le principe de ce séchage réside dans le fait qu'on parvient à augmenter la surface spécifique de contact du produit liquide avec l'air en le pulvérisant sous forme de spray ; la poudre obtenue par ce type de séchage est d'ailleurs appelée « spray »

Il existe trois technologies différentes de pulvérisation :

- Les turbines centrifuges : Le liquide est amené au centre d'une turbine entraînée par l'intermédiaire d'engrenages. Le liquide soumis à la force centrifuge est éjecté en fines gouttelettes.
- Les buses sous pression de liquide : la pulvérisation est effectuée par le passage du liquide à travers un orifice, l'énergie de dispersion étant apportée par le liquide lui-même, véhiculé sous pression.
- Les buses bifluide : le liquide est alimenté à une pression relativement basse. La dispersion en gouttelettes se fait par un jet d'air comprimé à haute vitesse (procédé intéressant pour les produits comme le lait qui ne tolère pas de forte pression).



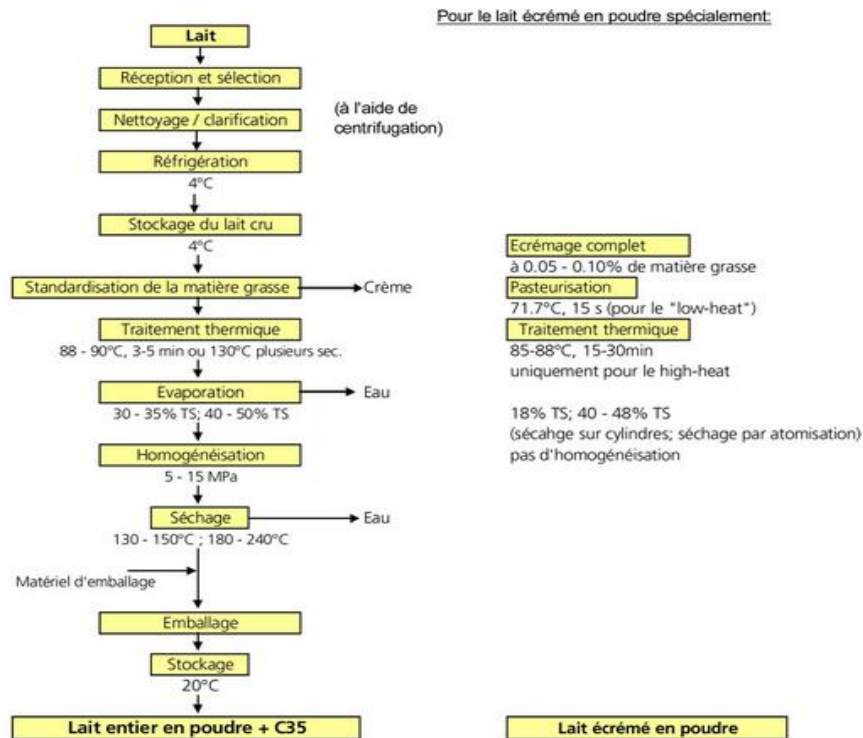
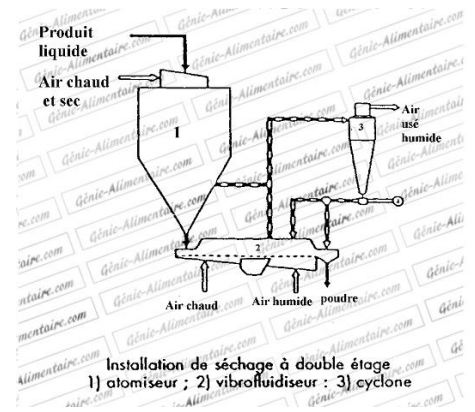
Association avec un lit fluidisé :

Un lit fluidisé (interne ou externe à la tour d'atomisation) est souvent associé. Il permet de refroidir la poudre et d'économiser de l'énergie. En effet, l'augmentation de l'extrait sec (ES) au-dessus de 90 % demande une consommation importante d'énergie dans la tour de séchage pour évaporer l'eau. En ajoutant un lit fluidisé, c'est ce matériel, qui consomme moins d'énergie, qui permet d'augmenter l'ES.

Produit séché par atomisation :

Le lait en poudre (air entre 200°C et 250°C ; humidité résiduelle autour de 5%), lactosérum, le café soluble, boissons...

Exemple de process de fabrication de lait en poudre :



III.6.4. Séchage par lyophilisation

a) Principe

L'eau est éliminée par sublimation : il faut donc passer par une étape de congélation. L'eau devenue glace se transforme en vapeur (sans passer par l'état liquide) dans des conditions précises de température et de pression (-20°C et sous vide proche du 0 bar) suivant le diagramme de changement d'état de l'eau.

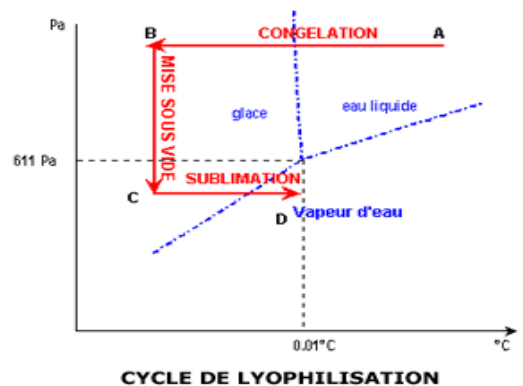
b) Les étapes

Congélation du produit à -20°C : on travaille en général sur des produits pré-concentrés afin de réduire la teneur en eau à éliminer, car le coût du traitement est proportionnel à la quantité d'eau éliminée. Exemple : cryoconcentration sur le café ou les jus de fruits.

Mise sous vide du lyophilisateur.

Sublimation : la vapeur d'eau est éliminée au fur et à mesure. On parle de « dessiccation primaire » qui se produit vers - 20 °C.

Désorption : l'évaporation sous vide se poursuit pour éliminer ce qui reste en eau fortement liée. On parle de « dessiccation secondaire ». La température remonte à +30 + 40 °C.



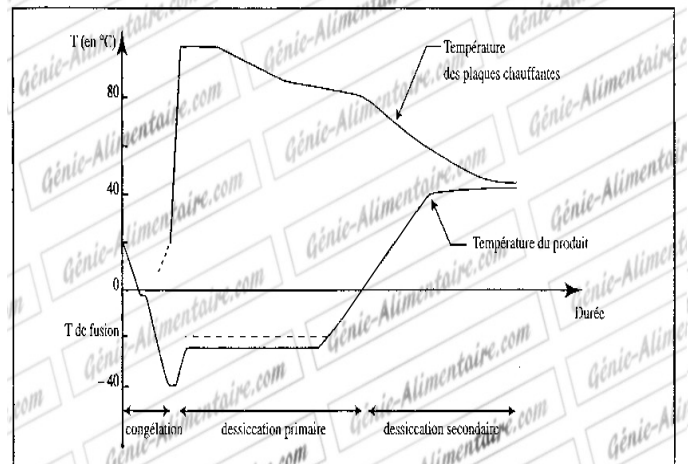
Cassage du vide : pour revenir aux conditions ambiantes.

c) Intérêts / limites

On obtient une très bonne qualité gustative des produits car il n'y a que l'eau qui est partie : ceci est marqué sur le café, si on compare du « café soluble atomisé » avec du « café lyophilisé ».

Le coût est très élevé car le procédé nécessite beaucoup d'énergie et est très long.

C'est pourquoi son usage est réservé aux produits « chers », comme le café ou les plats préparés cuisinés « de l'extrême » pour les sportifs de hauts niveaux (montagne, désert ou bateau).



Évolution de la température du produit et des plaques de chauffage au cours d'un cycle de lyophilisation

d) Procédé industriel

L'appareil est un tunnel de 3 m de diamètre et 12 m de longueur. Le procédé peut être présenté en deux étapes.

La congélation du produit, de 10 à 15 mm d'épaisseur maximum, placé sur des plateaux, se fait par brassage de l'air froid créé par des batteries à - 40 °C, puis l'enceinte est mise sous pression réduite au moyen de pompes à vide.

Les plaques chauffantes situées entre les plateaux, sont parcourues par un fluide caloporteur à 80 à 90 °C. La vapeur d'eau (à -20 °C) se forme et va se condenser sur les batteries à - 40 °C et les recouvrir de glace. Des chariots porte-plateaux facilitent la manutention.

La plus grande partie de l'eau est extraite par sublimation : passage de l'état de glace à l'état de vapeur.

Actuellement, on réalise principalement la lyophilisation des champignons, celle des aromates, légumes, jus de fruits, café, thé, D'autres produits alimentaires, tels que viandes et produits de la pêche, sont lyophilisés en quantité très faible, leur consommation trop limitée ne justifie pas une production à l'échelle industrielle dans tous les pays.

Il faut 15 à 20 heures pour traiter 2,5 tonnes de produit (faible productivité).

