

Traitement thermique

Les objectifs du traitement thermique

Avant l'apparition du traitement thermique, le lait était une source d'infection, car il constitue un milieu de croissance parfait pour les micro-organismes. Le lait répandait parfois des maladies comme la tuberculose et le typhus.

Le terme "pasteurisation" commémore Louis Pasteur qui, au milieu du 19^e siècle, réalisa ses travaux fondamentaux sur l'effet létal de la chaleur sur les microorganismes et l'utilisation du traitement thermique comme technique de conservation. La pasteurisation du lait est un type de traitement thermique spécial, que l'on peut définir comme : "tout traitement du lait assurant la destruction certaine du bacille tuberculeux (B.T.), sans influencer nettement sur les propriétés physiques et chimiques."

Si l'on étudie l'histoire de la pasteurisation, il est bon de préciser que, bien que les savants du monde entier aient été à peu près d'accord sur le niveau de traitement thermique nécessaire, l'utilisation commerciale du procédé n'a pas été, pendant longtemps, contrôlée avec rigueur. Le lait était souvent chauffé à l'excès ou insuffisamment, ce qui lui conférait un goût de cuit ou y laissait des B.T. parfaitement viables.

Outre les micro-organismes pathogènes, le lait contient également d'autres substances et micro-organismes susceptibles de gâter le goût et de raccourcir la durée de conservation de différents produits laitiers. Le traitement thermique a donc pour objectif secondaire de détruire, dans toute la mesure du possible, ces autres organismes et systèmes enzymatiques. Ceci exige un traitement thermique plus intense que celui nécessaire à la destruction des pathogènes.

Cet objectif secondaire du traitement thermique a acquis de plus en plus d'importance à mesure qu'augmentaient le nombre et la taille des laiteries. Du fait des intervalles plus longs entre livraisons, les micro-organismes disposent de davantage de temps pour se multiplier et pour engendrer des systèmes enzymatiques, malgré les techniques de réfrigération modernes. De plus, les constituants du lait se dégradent, le pH chute etc. Pour remédier à ces problèmes, le traitement thermique doit être appliqué aussi vite que possible après l'arrivée du lait à la laiterie.

Facteurs restrictifs du traitement thermique

Dans le cas du lait, Un traitement thermique intense est souhaitable du point de vue microbiologique. Mais ce traitement entraîne aussi un risque d'effets nocifs sur l'aspect, le goût et la valeur nutritive du lait. Les protéines du lait sont dénaturées aux températures élevées. Un traitement thermique intense détériore donc considérablement les propriétés du lait propres à la fabrication du fromage. Un chauffage intense entraîne une modification du goût : tout d'abord un goût de cuit, puis un goût de brûlé. La combinaison de température et de durée choisie est donc une question d'optimisation, pour laquelle on devra tenir compte à la fois des effets microbiologiques et des problèmes de qualité.

Le traitement thermique étant devenu la partie la plus importante du traitement du lait et ses effets sur le lait étant désormais mieux compris, on a pu adopter différentes catégories de traitement thermique, comme le montre le **tableau 1**.

Combinaison de température et de durée

La combinaison de température et de temps de chambrage est très importante, car elle détermine l'intensité du traitement thermique. La Figure 1 illustre les courbes d'effet létal pour les bactéries coliformes et typhoïdes et les bacilles tuberculeux. Selon ces courbes, les coliformes sont tués si le lait est chauffé à 70°C et maintenu à cette température pendant

environ une seconde. A une température de 65°C, il faut un temps de chambrage de 10 secondes pour tuer les coliformes. Ces deux combinaisons - 70°C/1 s et 65°C/10 s - ont donc le même effet létal. Les bacilles tuberculeux sont plus résistants au traitement thermique que les coliformes. Un temps de chambrage de 20 secondes à 70°C ou d'environ 2 minutes à 65°C s'impose pour assurer leur destruction intégrale. Le lait peut également contenir des microcoques résistants à la chaleur. En règle générale, ils sont totalement inoffensifs.

Tableau 1 : Principales catégories de traitement thermique dans l'industrie laitière

Procédé	Température	Durée
Thermisation	63 – 65°C	15 s
Pasteurisation LTLT du lait	63 °C	30 min
Pasteurisation HTST du lait	72 – 75 °C	15 à 20 s
Pasteurisation HTST de la crème etc.	>80°C	1 à 5 s
Ultra-pasteurisation	125 – 138°C	2 à 4 s
UHT (Stérilisation en continu), habituellement	135 – 140°C	Quelques secondes
Stérilisation en récipients	115 – 120°C	20 à 30 min

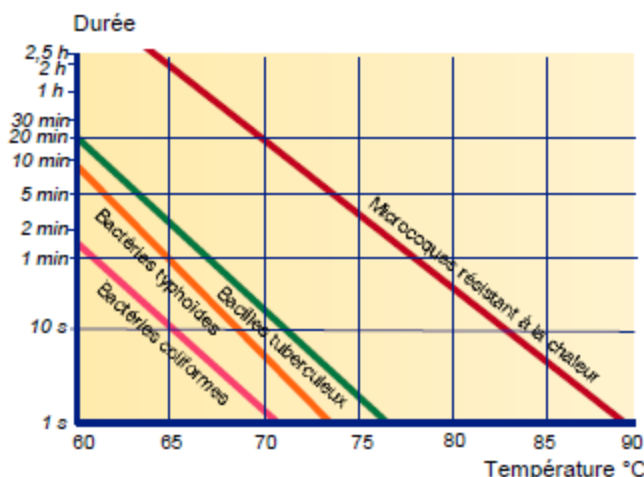


Figure 1 : Effet létal sur les bactéries.

Différents types d'échangeurs de chaleur

Echangeurs de chaleur à plaques

La plus grande partie du traitement thermique des produits laitiers s'effectue dans des échangeurs de chaleur à plaques. L'échangeur de chaleur à plaques (souvent appelé PHE en abrégé) est constitué d'un ensemble de plaques en acier inoxydable, fixé sur un bâti.

Le bâti peut contenir plusieurs ensembles de plaques distincts - ou sections - dans lesquels s'effectuent les différentes phases du traitement : préchauffage, chauffage final et refroidissement. Le fluide de chauffage est de l'eau chaude et le fluide de refroidissement de l'eau froide, de l'eau glacée ou du glycol propylique, suivant la température du produit en sortie requise.

Les plaques sont cannelées selon un dessin destiné à assurer une transmission de chaleur optimale. L'ensemble de plaques est comprimé dans le bâti. Des points d'appui sur les cannelures écartent les plaques les unes des autres, formant de minces canaux entre elles.

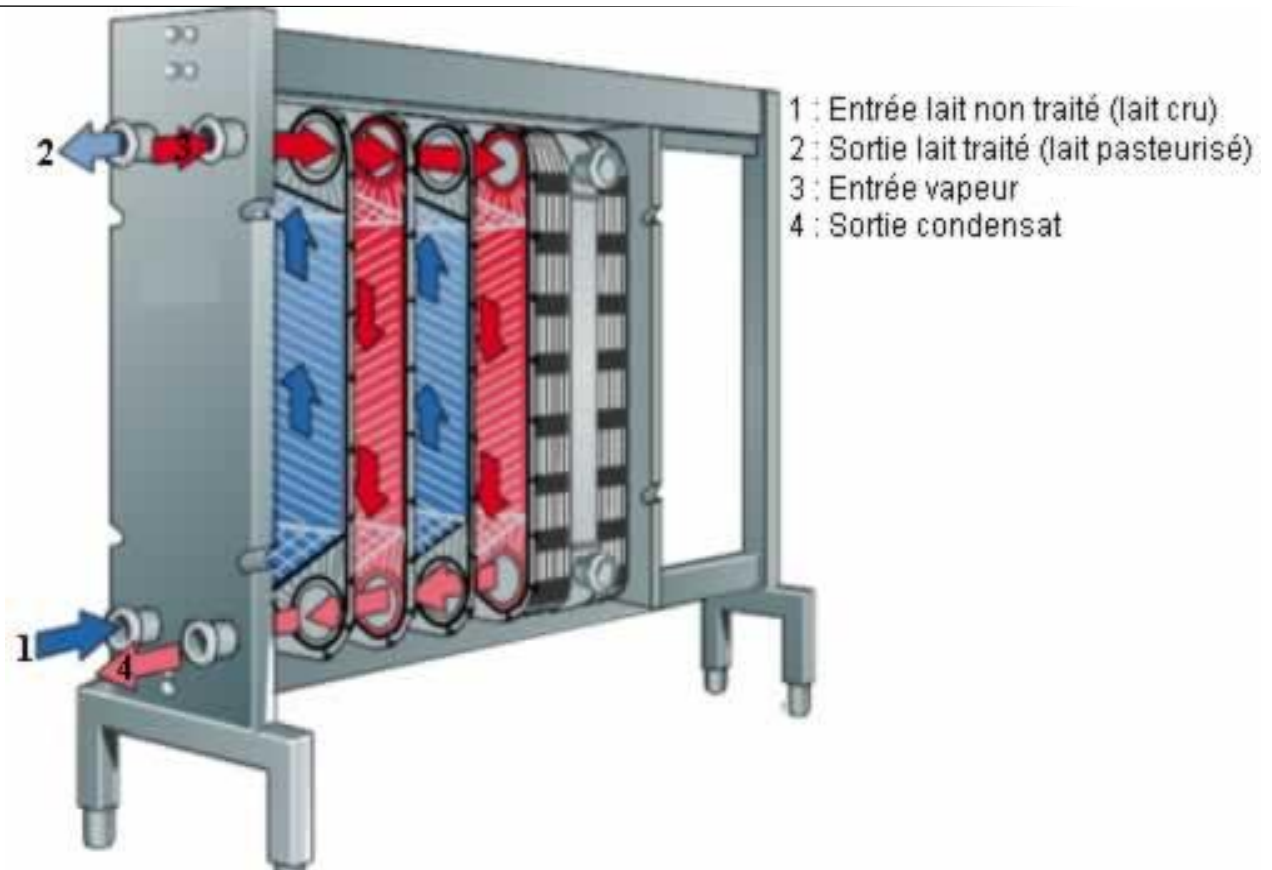


Figure 2 : Principe d'écoulement et d'échange thermique dans un échangeur de chaleur à plaque

Echangeurs de chaleur tubulaires

Les échangeurs de chaleur tubulaires (THE) s'utilisent dans certains cas pour la pasteurisation ou le traitement UHT des produits laitiers. A la différence des échangeurs de chaleur à plaques, l'échangeur de chaleur tubulaire, illustré sur la figure 3, ne présente aucun point de contact dans les conduits de produit et peut donc traiter des produits contenant des particules, jusqu'à une certaine taille. La taille maximale des particules dépend du diamètre du tube. L'échangeur de chaleur tubulaire peut également fonctionner plus longtemps entre deux nettoyages que l'échangeur de chaleur à plaques, lors du traitement UHT.

Du point de vue du transfert thermique, l'échangeur de chaleur tubulaire est moins efficace qu'un échangeur de chaleur à plaques.

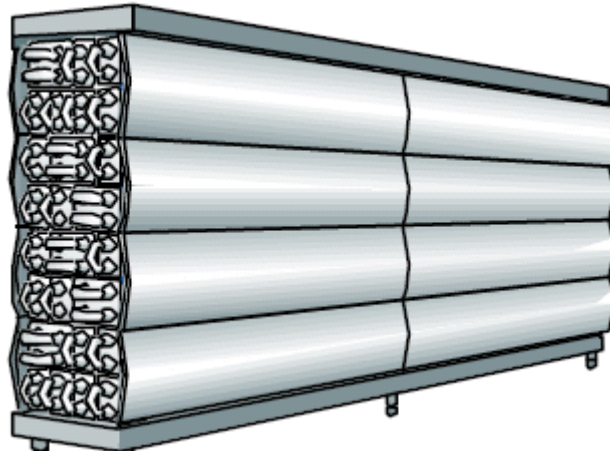


Figure 3 : Principe d'écoulement et d'échange thermique dans un échangeur de chaleur tubulaire

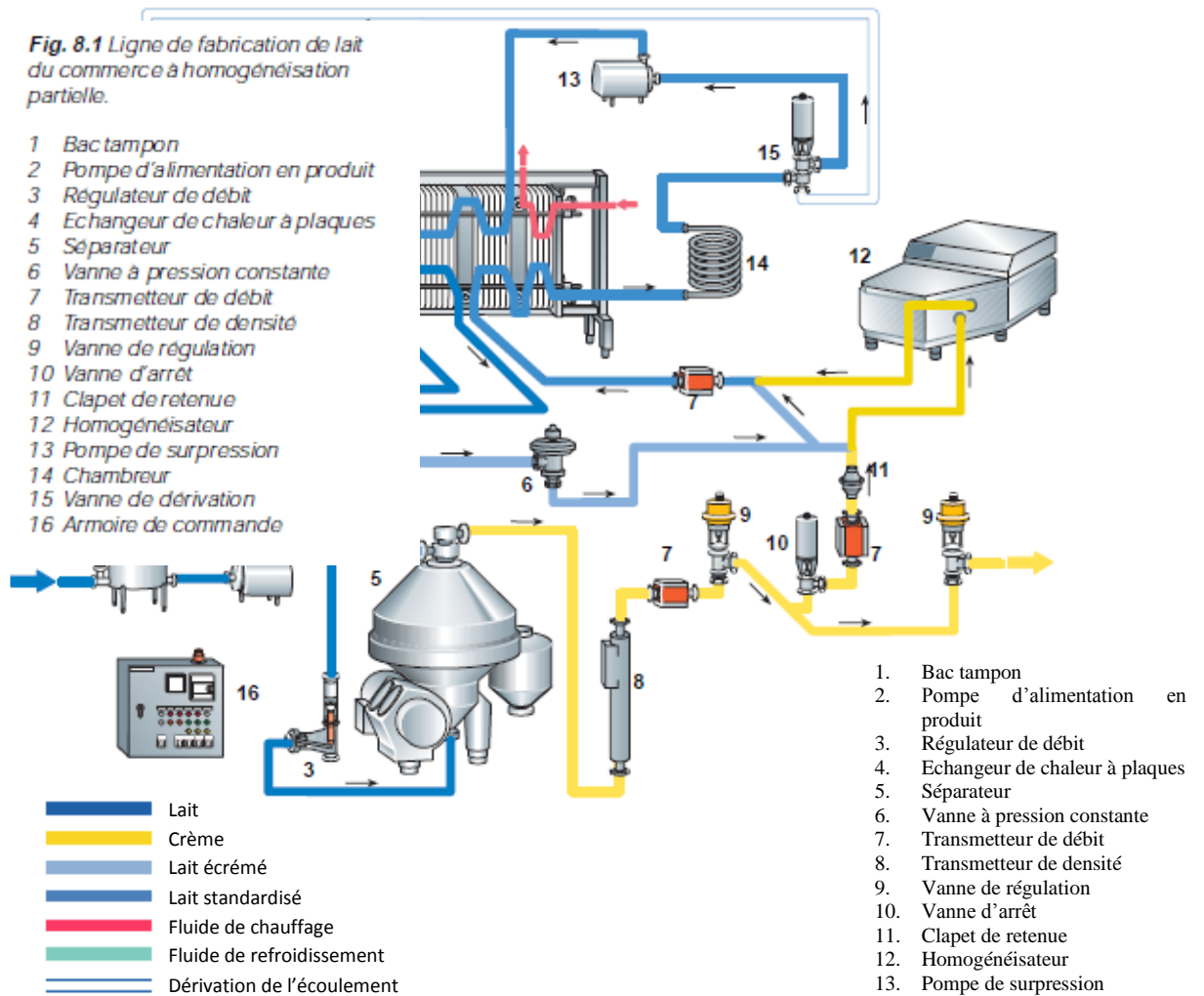


Figure 4 : Ligne de fabrication de lait du commerce à homogénéisation partielle.

II.5. Blanchiment

II.5.1. But du blanchiment

Le blanchiment est une brève précuisson à l'eau ou à la vapeur, à laquelle on soumet les aliments végétaux que l'on consomme habituellement à l'état cuit, et que l'on se propose de conserver par appertisation, déshydratation ou congélation. Les fruits par conséquent ne sont généralement pas blanchis, à l'exception des pêches, des abricots et des pommes lorsqu'on en prépare des pulpes pour confiserie.

Le blanchiment vise divers buts :

- Attendrir le tissu végétal de façon à lui permettre de supporter sans dommage les manipulations ultérieures (par exemple asperge, haricots verts), et à réduire son volume apparent (par exemple épinards et autres légumes feuillus) afin de faciliter ou rendre possible le conditionnement dans des emballages (par exemple boîtes pour les conserves appertisées, cartons pour les produits congelés).
- Éliminer l'air et autres gaz des espaces intercellulaires, pour diminuer les réactions d'oxydation (corrosion des métalliques, altération des produits congelés) et la pression dans les récipients lors de la stérilisation.
- Accroître la perméabilité des parois cellulaires, ce qui augmente la vitesse de déshydratation et facilite la réhydratation ultérieure.
- Compléter le lavage du produit, en réduisant aussi bien les contaminations de nature chimique que la charge microbienne.
- Détruire – et c'est l'une des tâches les plus importantes du blanchiment - les enzymes pouvant provoquer des détériorations, notamment lors de l'entreposage à l'état déshydraté ou congelé.

Lorsque le blanchiment est pratiqué dans l'eau on peut y associer certains traitements chimiques, tels que : l'addition de sel soluble de calcium en vue de raffermir, par réaction avec la pectine, les tissus de certains fruits ou légumes (par exemple pommes en tranche, pommes de terre) ; l'addition de phosphates, qui en complexant les traces de fer évitent le brunissement par formation de tannate de fer et réduisent l'oxydation du carotène ; l'addition de sulfite pour empêcher le brunissement non enzymatique lors de la déshydratation (par exemple pomme de terre, chou).

II.5.2. Méthodes et contrôle du blanchiment

Le blanchiment doit être effectué à une température et pendant une durée qui assurent la destruction de l'enzyme de détérioration la plus thermorésistante dans le cas considéré. La nature de cette enzyme peut différer d'un aliment à l'autre, et les conditions optimales de blanchiment doivent être établies expérimentalement ; pour les produits végétaux destinés à la congélation, par exemple, la température de blanchiment est comprise en général entre 70 et 100°C, et la durée entre 1 et 5 minutes.

Le blanchiment comporte à côté des avantages signalés précédemment, divers inconvénients : ramollissement excessif de certains produits ; perte de nutriments (vitamines hydrosolubles, sels minéraux, sucres) par diffusion dans l'eau ; transformation d'une partie de composés odorants. Ces inconvénients dépendent en partie des modalités du blanchiment.

Le blanchiment est effectué le plus souvent par immersion dans l'eau chaude ; il faut une eau adoucie et gardé propre par un renouvellement adéquat. Le blanchiment à l'eau est peu coûteux ; il est indispensable pour les légumes qu'il faut débarrasser de saveur acre (par exemple le chou) ou de certains pigments indésirables (par exemple la rutine des asperges). Il consomme toutefois beaucoup d'eau, et produit par conséquent de gros volumes d'eaux résiduaires.

Le blanchiment à la vapeur, quoique plus coûteux, plus lent et d'un emploi moins général, entraîne une moindre perte de composés hydrosolubles et réduit davantage la charge microbienne superficielle.

L'efficacité du blanchiment peut être contrôlée d'après l'inactivation ou la persistance de deux enzymes, largement répandue dans les végétaux et dans les microorganismes : la catalase et la peroxydase. L'activité de la première est mise en évidence en broyant le produit blanchi et en le mélangeant à du carbonate de calcium et du peroxyde d'hydrogène : un dégagement gazeux (O₂) indique une activité catalasique. L'activité peroxydasique est révélée par l'apparition d'une teinte brun-noir lorsqu'on place du guaïacol et du peroxyde d'hydrogène au contact du produit.

La catalase est bien moins résistante à la chaleur que la peroxydase ; cette dernière est en fait la plus thermorésistante parmi les enzymes de détérioration. L'inactivation des enzymes par la chaleur obéit à des lois analogues à celles qui sont exposées à propos de la destruction des micro-organismes par la chaleur. Les notions de traitement thermiques équivalents et de traitements hautes température – courte durée sont donc applicables aux enzymes, et il est indispensable de tenir compte tant de la vitesse de pénétration de la chaleur que de la vitesse de refroidissement après le blanchiment. Dans le cas du maïs, une réduction de 90% de l'activité peroxydasique initial s'obtient par les traitements équivalents à 10 mn à 100°C, ou 5 mn à 120°C, ou 1 mn à 140°C.

Les traitements de blanchiment appliqués en pratique assurent en général une inactivation complète de la catalase, mais seulement partielle de la peroxydase ; un traitement thermique de blanchiment capable de supprimer toute activité de la peroxydase est en effet superflu pour les produits destinés à l'appertisation, et provoquerait une cuisson excessive des produits devant être déshydraté ou congelés. C'est par conséquent d'après l'inactivation plus ou moins prononcée de la peroxydase que l'on peut suivre la progression du blanchiment. Certains chercheurs ont toutefois observés, notamment dans le cas d'abricots blanchis et conservé ensuite à l'état congelé, une régénération de l'activité peroxydasique qui avait disparu ; on suppose que, lorsque le traitement thermique est modéré, la dénaturation de l'enzyme reste réversible (probablement par échange réversible de ponts disulfure).

III.1. Traitements par la chaleur

III.1.1. Appertisation

Parmi les procédés de conservation des aliments, celui qui consiste à les enfermer dans un récipient hermétiquement clos, et à les soumettre à un chauffage assurant la destruction ou l'inactivation des micro-organisme et des enzymes susceptibles de les altérer.

L'appertisation est inventée par Nicolas Appert vers 1800, plus de 50 ans avant les découvertes de Pasteur.

Les conserves appertisées sont considérées comme étant des denrées alimentaire d'origine végétales ou animale périssables, dont la conservation est assurée par l'emploi combiné des deux techniques :

- ✓ Conditionnement dans un récipient étanche aux liquides, aux gaz et aux micro-organismes,
- ✓ et traitement par la chaleur. Ce traitement doit avoir pour effet de détruire ou d'inhiber totalement, d'une part les enzymes, d'autre part les micro-organismes et leurs toxines, dont la présence ou la prolifération pourrait altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à l'alimentation humaine.

L'étanchéité du récipient est une condition indispensable pour garder le contenu à l'abri des contaminations microbiennes extérieures.

Donc la mise en œuvre du procédé Appert selon la méthode classique comporte :

- 1) L'introduction du produit, convenablement préparé, dans un récipient (boîte, bocal ou flacon) ;
- 2) la fermeture hermétique du récipient ;
- 3) le traitement thermique du récipient avec son contenu ;
- 4) le refroidissement.

III.1.2. Stérilisation

III.1.2.1. Rappels

- **Traitement thermique**

Exposés à une température suffisamment élevée pendant un temps suffisamment long les micro-organismes meurent ; mais la résistance à la chaleur varie considérablement d'une espèce à l'autre (tableau 4), et même d'une souche à l'autre, voir pour une même souche selon les conditions et l'âge de la culture, car en général, les formes végétatives sont moins résistantes à la chaleur pendant la croissance exponentielle que pendant la phase de latence ou la phase stationnaire. Le caractère qui joue le plus dans la résistance à la chaleur est la présence ou l'absence de spores ; celles-ci résistent bien davantage que les formes végétatives, et de ce fait les espèces thermorésistantes se rencontrent parmi celles qui sont capables de former des spores.

Tableau 4 : Temps de réduction décimale à 121°C pour les spores de quelques bactéries.

Souches	Minutes
<i>Bacillus stearothermophilus</i> (FS 1518)	4 à 5
<i>Clostridium thermosaccharolyticum</i>	3 à 4
<i>Clostridium nigrificans</i>	2 à 3
<i>Clostridium sporogenes</i> (PA3679)	1.5
<i>Clostridium botulinum</i> (Types A et B)	0.1 à 0.2
<i>Bacillus coagulans</i> (<i>B. thermocidurans</i>) (à pH 4.0 – 4.5)	0.01 à 0.07

Les moisissures, dont les spores sont morphologiquement et physiologiquement très différente des formes de résistance appelées « spores » chez les bactéries, ne présentent pas de grande résistance à la chaleur.

Le traitement thermique affecte les cellules bactériennes même lorsqu'il n'est pas suffisant pour les détruire elles deviennent alors plus sensibles aux agents inhibiteurs présents dans le milieu. D'autre part le chauffage, selon son intensité, fait une sélection parmi les espèces présentes ; ainsi un traitement thermique modéré va éliminer la plupart des germes non sporulés, ne laissant survivre que les plus résistants parmi ceux-ci, tels que *Micrococcus* et *Streptococcus* ; à l'opposé, seules des spores d'espèces très thermorésistantes, notamment de *Clostridium sporogenes* et *C. thermosaccharolyticum*, vont rester après un chauffage intense.

- **Inactivation et destruction des micro-organismes**

Il faut toutefois examiner de plus près la notion même de survie de bactéries après un chauffage. L'expérience montre que les spores d'une même suspension, soumise dans des conditions identiques à des chauffages plus ou moins long, révèlent une résistance plus ou moins grande selon la composition du milieu dans lequel elles sont repiquées ensuite (tableau 5).

Tableau 5 : Effet du milieu de réensemencement sur la survie de spores de *Bacillus natto* chauffées à 100°C dans du tampon phosphate, pH 7.0 ; 10⁷ spores/ml.

Milieu de réensemencement	Durée de chauffage à 100°C	
	Permettant la survie (minutes)	Mortelle (minutes)
Bouillon nutritif (BN)	10	12
BN + 0.00005% de glucose	10	12
BN + 0.0005% de glucose	16	18
BN + 0.01% de glucose	18	20
BN + 0.1% de glucose	20	22
BN + 0.5% de glucose	20	22
BN + extrait de levure	20	22
BN + extrait de foie	20	22
BN + thioglycolate de Na	10	12
BN + cystéine	10	12

Les spores de *Bacillus natto* se développent dans le bouillon nutritif, non enrichi, après avoir subi un chauffage de 10mn à 100°C, mais ne se développent plus dans le même milieu lorsque la durée du traitement thermique atteint 12mn ; en revanche, lorsque le même milieu est additionné de 0.1 ou 0.5% de glucose, d'extrait de levure ou d'extrait de foie, on observe une survie même après 20mn de chauffage.

Les résultats de telles expériences montrent qu'au cours du traitement thermique les bactéries, ou du moins leurs spores, perdent la capacité d'utiliser tel ou tel nutriment, ou de trouver dans un milieu les sources d'énergie nécessaires à leur métabolisme.

III.1.2.2. Stérilisation des produits acides

La composition du produit dans lequel les microorganismes sont soumis au chauffage exerce une très grande influence sur la résistance à la chaleur. Le pH est sans aucun doute l'un des facteurs les plus importants (tableau 6). Les aliments sont classés en trois groupes d'après le pH : peu acides, acides et très acides (tableau 7).

Un traitement thermique modéré suffit pour l'appertisation des produits acides : d'une part, en effet, les micro-organismes sont plus facilement tués par le chauffage lorsque le pH est bas ; d'autre part, les espèces sporulées thermorésistantes de même que la plupart des bactéries même non sporulées, ne se développent pas en milieu acide, de telle sorte que l'on a à se préoccuper uniquement des levures, des moisissures. Un chauffage de quelques minutes à 85-90°C permet en général de s'en débarrasser ; si on a recourt dans certains cas à des températures plus élevées, c'est ou bien pour inactiver des enzymes, ou bien pour abréger la durée du traitement thermique afin de mieux préserver les caractères organoleptiques de l'aliment.

Tableau 6 : Effet du pH du milieu (tampon phosphate) sur la résistance à la chaleur (115°C) de spore de *C. sporogenes* (10⁴ spores/ml)

pH	Durée maximum de chauffage permettant la survie (minutes)
5.0	9
5.7	12
6.0	15
6.6	21
7.0	25
7.5	20
8.2	15

Tableau 7 : Classement de quelques aliments végétaux selon le pH.

Aliments	pH	Exemple
Peu acides	≥ 4.5	Petits pois, haricots vert
Acides	4.0 à 4.4	Tomates, ananas et poires
Très acides	< 4.0	Agrumes et choucroutes

La différence est due essentiellement au pH. De nombreuses moisissures peuvent se développer à des pH voisins de 2.0 ou supérieurs à 9.0 et des levures entre 2.5 et 8.5 ; rare sont en revanche les bactéries capables de proliférer à des pH inférieurs à 4.0 (*Lactobacillus* par exemple) ou proche de 4.0. Les *Clostridium* et spécialement *Clostridium botulinum*, dangereux en raison de la toxine qu'il produit et de la résistance de ses spores à la chaleur, ne tolèrent pas les milieux trop acides ; *C. botulinum* ne se développe pas en dessous de 4.5, et cette circonstance permet d'employer des traitement thermiques relativement doux pour la plupart des conserves de fruits. Il est de même pour les produits dont le pH a été abaissé, soit par addition d'acide, soit par fermentation lactique (choucroute, concombre).

Les aliments pauvres en protéines, tels que les légumes verts sont moins tamponnés et se laissent acidifier plus facilement.

III.1.2.3. Stérilisation des produits non acides

Dans le cas de stérilisation des aliments non ou peu acide la température doit dépasser 100°C (entre 115 et 130°C).

Il est nécessaire de rappeler que si l'on désire que la température corresponde à la pression de la vapeur, il est indispensable d'éliminer l'air. D'autre part le transfert de chaleur est bien meilleur en l'absence d'air.

Il faut éviter à tout prix de faire subir des chocs aux boîtes, dont l'étanchéité risque de souffrir, ce principe ne doit pas être perdu de vue lors du choix des appareils de manutention des boîtes.

Si nous considérons, pour les produits non acides, les cas où le traitement thermique intervient avant le remplissage. Le procédé consiste à pratiquer, dans un échangeur de chaleur approprié à la circonstance du produit, une stérilisation « éclair » (haute température brève durée), de manière à atteindre la stérilité pratique en un temps très court, ce qui permet de respecter au maximum les caractères organoleptiques de la denrée. Il est nécessaire 'atteindre 130-135°C, et à cette fin –étant donné que l'on a affaire à des produits contenant de l'eau - d'opérer sous pression.

III.1.2.4. Défauts de stérilisation

Le défaut de stérilisation peut avoir diverses causes :

- ❖ Barème de stérilisation insuffisant ;
- ❖ charge microbienne initiale anormalement élevée (matière première en voie d'altération, légumes insuffisamment lavés, certains ingrédients : sucre, farine, épice fortement contaminés) ;
- ❖ mauvaise conduite de l'autoclave ou du stérilisateur ;
- ❖ instruments de contrôle déréglés.

Le défaut de stérilisation, que la boîte soit bombée ou non, est caractérisé au contraire par la flore microbienne composée uniquement d'espèces thermorésistantes, souvent d'une seule espèce. Sous le microscope on observe toujours un grand nombre de cellules bactériennes ; mais si les espèces présentes ne sont pas gazogènes, ou n'ont rencontré des conditions favorables à la production d'une quantité suffisante de gaz, il n'y a pas de bombage.

III.2. Traitements par le froid

A l'air et à la température ordinaire, de nombreux fruits dépassent rapidement la maturité optimum et entrent dans la phase de sénescence. C'est pour prolonger la conservation à l'état frais que l'on a recours à la réfrigération et aux atmosphères dite contrôlées.

La congélation comme la réfrigération, fait appel à l'abaissement de la température pour prolonger la durée de conservation des aliments. Quoique les températures mises en jeu lors de la congélation soient bien plus basses que celles dont on se sert pour la réfrigération, c'est la formation de cristaux de glace au sein des aliments qui constitue la différence essentielle entre les deux procédés. A l'état réfrigéré les cellules des tissus végétaux restent en vie pendant un temps plus ou moins long, et les métabolismes cellulaires sont seulement ralentis. Au contraire la congélation, telle qu'elle est utilisée actuellement pour la conservation des aliments, arrête à peu près complètement et irréversiblement toute activité métabolique. Il faut par conséquent que l'aliment à congeler ait atteint, avant la congélation, un stade de développement ou de maturation qui en permette la consommation.

III.2.1. Les prétraitements

L'objectif de cette phase peut être de « durcir » le légume par un renforcement des arrières mécaniques et, parfois, par une activation d'un métabolisme de défense. Ainsi le maintien des pommes de terre et carottes à 15 – 16°C et 80% d'humidité relative pendant 10 à 14 jours permet de limiter les pourritures dues aux *Phoma* sp. et *Fusarium* spp. Dans certains cas, le prétraitement par air chaud se fait sous atmosphère contrôlée : les oignons maintenus 10 à 14 jours à 30°C dans un silo ventilé (425m³ d'air/heure/tonne) seront peu atteints par *B. allii*.

Un prétraitement des légumes à basse température est toutefois beaucoup plus fréquent. Selon la nature du produit et les risques microbiologiques l'un des quatre principaux systèmes de pré-réfrigération sera retenu :

- Refroidissement hydrique : asperge, poireau.
- Refroidissement par aspiration : chou, laitue.
- Refroidissement par l'air : oignon.
- Refroidissement par air humide : chou-fleur, artichaut.

Les essais réalisés à Brest sur chou-fleur en 1988 ont indiqué, par exemple, que les *Pseudomonas* fluorescents pectinolytiques (essentiellement *P. marginalis*) présentaient un risque moindre de pourriture molle après traitement par froid humide. Cet avantage, venant s'ajouter aux gains de qualité et de durée de conservation, le procédé de froid humide est maintenant largement utilisé en Bretagne.

III.2.2. La réfrigération

La réfrigération retarde et ralentit la maturation et spécialement les réactions liées à la respiration.

Avec les fruits fragiles le refroidissement, à l'air ou à l'eau, doit être rapide et intervenir immédiatement après la récolte. Quant à la température de régime, elle dépend pour chaque fruit de la durée de conservation désirée. Les pommes, par exemple, se conservent une fois plus longtemps à 4 qu'à 15°C, les poires deux fois plus longtemps à -2 qu'à +1°C. En général, lorsque la température est basse le risque de développement fongique est moindre, mais celui de maladie physiologique peut être accru ; certains fruits présentent en effet, s'ils sont exposés trop longtemps à des températures trop basses quoique supérieures au point de congélation, des brunissements superficiels ou internes de nature enzymatique non parasitaire. Chaque fruit présente une température critique : les bananes par exemple, ne doivent pas être entreposées au-delà de quelques jours à des températures inférieures à 12-13°C, faute de quoi on risque une inhibition permanente de la maturation et de l'activité respiratoire, l'absence totale d'hydrolyse d'amidon, la formation de taches, une perte d'arôme et le durcissement ; les agrumes supportent mal des températures d'entreposage inférieures à 3°C ; l'ananas, l'avocat, certains melons sont également sensibles à des températures inférieures à un certain seuil, et d'autant plus sensibles que le processus de maturation est plus avancé. Des pommes et des poires peuvent aussi présenter des maladies physiologiques en fin d'entreposage réfrigéré prolongé (échaudure des pommes). On pense que ces effets défavorables des basses températures résultent de différences dans la vitesse de fonctionnement de divers systèmes enzymatiques à ces températures, d'où accumulation de métabolites indésirables.

Pour limiter la dessiccation des fruits et des légumes, il est nécessaire de maintenir une humidité relative élevée (85 à 95%) dans l'atmosphère des entrepôts réfrigérés ; cela favorise toutefois la croissance de moisissures, d'où l'emploi fréquent de fongicides.

Lorsque les installations sont bien faites (isolation thermique efficace, grande surface réfrigérante afin que la différence de température entre surface réfrigérante et produit soit faible) et correctement conduites, la simple transpiration des fruits et légumes suffit à maintenir l'humidité relative voulue. Les entrepôts doivent cependant être ventilés pour homogénéiser l'atmosphère, apporter de l'oxygène et éliminer les émanations volatiles des végétaux ; il faut également veiller à ce qu'il ne se produise pas de condensation localisées, qui abaissent l'humidité relative et entraînent une certaine déshydratation du produit.

À la fin de l'entreposage au froid, les végétaux qui doivent subir une maturation complémentaire sont réchauffés de préférence dans de l'air sec pour éviter la condensation d'humidité à leur surfaces, ce qui augmenterait les risques de moisissement. La pratique qui consiste à les asperger d'eau est extrêmement défavorable, y compris pour leur maturation.

Tableau 8 : Réfrigération des fruits et des légumes (températures recommandées et durées de conservation)

Produit	Température d'entreposage (°C)	Durée approximative de conservation
Artichaut	0	1 mois
Asperge	0	2-4 semaines
Carotte	-1 à +1	4-6 mois
Concombre	7 à 10	1-2 semaines
Chou	0	2-4 mois
Chou de Bruxelles	0 à -1	3-6 semaines
Epinard	0	2-6 semaines
Haricot vert	0	1-3 semaines
Laitue	0	1-3 semaines
Oignon	0 à -3	6 semaines
Petit pois	0	1-3 semaines
Pomme de terre	5 à 10	4-8 mois
Abricot	0 à -1	2-4 semaines
Avocat	5 à 10	2-4 semaines
Banane	11 à 15	1.5-3 semaines
Cerise	0 à -1	1-4 semaines
Citron	11 à 15	1-4 mois
Fraise	0	5 jours
Framboise	0	5 jours
Orange	4 à 6	Jusqu'à 6 mois
Pamplemousse	4 à 8	2.5 mois
Pêche	+1 à -1	1-4 semaines
Poire	+1 à -2	1-7 mois
Pomme	+4 à -1	1-8 mois
Prune	0	0.5-2 mois
Raisin	0 à -1	1-6 jours
tomate	0	1-3 semaines

III.2.4. Congélation

La congélation qui représente pour de nombreux aliments le meilleur moyen de conservation à long terme, associe les effets favorables des basses températures à ceux de la transformation de l'eau en glace.

D'une part, aucun micro-organisme n'étant capable de se développer à une température inférieure à -10°C, l'entreposage à -18°C, qui est de règle pour les produits congelés, empêche toute activité microbienne ; par ailleurs la vitesse de la plupart des réactions chimiques est notablement abaissée, et les réactions métaboliques cellulaires sont complètement arrêtées ; ainsi que la transition eau-glace a l'avantage de figer la structure du tissu, et d'isoler l'eau sous forme de cristaux de glace, eau qui n'est par conséquent plus disponible ni comme solvant ni comme réactif. La diffusion des autres espèces chimiques au sein du tissu est de ce fait très lente, ce qui contribue, en même temps que l'abaissement de la température, à diminuer la vitesse de la plupart des réactions.

La formation des cristaux de glace a en revanche l'inconvénient d'entraîner souvent une détérioration mécanique de la texture du tissu.

III.2.4.1. Formation des cristaux de glace

➤ Nucléation

On sait que la température de fusion de la glace est 0°C. Lorsque l'eau pure est refroidie progressivement, la congélation ne se produit pas dès que la température atteint 0°C ; la formation de cristaux (de glace), ou nucléation, est toujours précédée d'une surfusion, autrement dit l'eau reste pendant un certain temps à l'état liquide à une température inférieure à celle du point de fusion. Ce phénomène s'observe aussi avec diverses solutions aqueuses.

La nucléation est favorisée par la présence de cristaux de divers sels insolubles, ou de particules solides de nature variée (poussières par exemple). Dans les aliments c'est toujours à une telle nucléation hétérogène que l'on a affaire, de telle sorte que la surfusion est relativement faible.

➤ Croissance des cristaux

La croissance des cristaux de glace résulte du fait que des molécules d'eau migrent dans le milieu et viennent s'agréger à un germe existant ; elle peut avoir lieu même à une température proche du point de congélation. En pratique, dans les aliments, la vitesse de croissance des cristaux de glace dépend de la vitesse de l'enlèvement de la chaleur, c'est-à-dire de la différence de température entre le cristal et le milieu qui l'entoure. Aux très basses températures, c'est le transfert de masse qui constitue le facteur limitant, car la viscosité accrue du milieu ralentit le déplacement des molécules d'eau. Avec les produits alimentaires, la concentration agit dans le même sens. Des substances en solution, telles que sels, alcools, sucres, protéines, ... ralentissent aussi la croissance des cristaux de glace :

Tableau 9 : vitesse de croissance du cristal de quelques solutions

	Température	Vitesse de croissance du cristal (mm/sec)
Eau	-9.7°C	61
NaCl 0.1 M	-9.7°C	41
Ethanol 0.1 M	-9.7°C	29
Saccharose 0.1 M	-9.7°C	6.6

➤ Dimension des cristaux

La dimension des cristaux de glace à la fin de la congélation dépend du nombre de germes cristallins formés à l'origine dans le milieu liquide. Par conséquent la régulation de la nucléation par la température permet d'obtenir des cristaux de la taille souhaitée : à basse température la nucléation rapide, et les nombreux germes donnent naissance à une multitude de cristaux de petite taille ; à une température proche du point de fusion, au contraire, la nucléation est lente, les noyaux cristallins sont peu nombreux, et il en résulte des cristaux de grande taille.

Il a été affirmé que les cristaux de grosse taille, surtout s'ils sont en forme d'aiguilles, endommagent mécaniquement les structures cellulaires.

Pour une même température de congélation, la cristallisation est souvent très différente d'un tissu à l'autre ; ces différences seraient dues, au moins en partie aux variations du degré de mobilité de l'eau dans les divers tissus ; les barrières cellulaires ralentissent la croissance des cristaux de glace.

➤ **Vitesse de congélation**

La vitesse de congélation est exprimée par l'abaissement de la température du produit par unité de temps. Il est préférable de se référer à la vitesse de libération de chaleur, à la vitesse de déplacement du front de congélation, ou au temps nécessaire pour franchir un intervalle de température déterminé.

La vitesse de congélation dépend principalement de la différence de température entre le produit à congeler et le milieu réfrigérant. Le tableau suivant donne quelques exemples :

Tableau 10 : Exemples de conditions de congélation

Vitesse de congélation	Vitesse d'abaissement de la température du produit	Appareillage
Lente	$\leq 2 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{mn}$	Congélateur domestique (air stagnant à -18°C)
Rapide	$10 \text{ à } 100 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{mn}$	Tunnel à air froid (p. ex. air à -40°C circulant à 20km/h)
Ultra-rapide	$1000 \text{ à } 10000 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{mn}$	Bain d'isopentane liquide (refroidi par de l'azote liquide)

III.2.4.2. Causes et effet des dommages à des structures cellulaires

➤ **Variations de volume**

Lorsque l'eau se transforme en glace, le volume augmente d'environ 9%. Par la suite, en se refroidissant, la glace subit une légère contraction. Les constituants autres que l'eau, les lipides notamment se contractent lors de la congélation. Ces variations de volume provoquent des tensions internes pouvant atteindre plusieurs bars.

Tableau 11 : Accroissement de volume de quelques aliments lors de la congélation.

Aliments	Taux d'accroissement
Jus de pomme	8.3 %
Framboises entières	4 %
Framboises broyées	6.3 %
Fraises entières	3 %
Fraises broyées	8.2 %

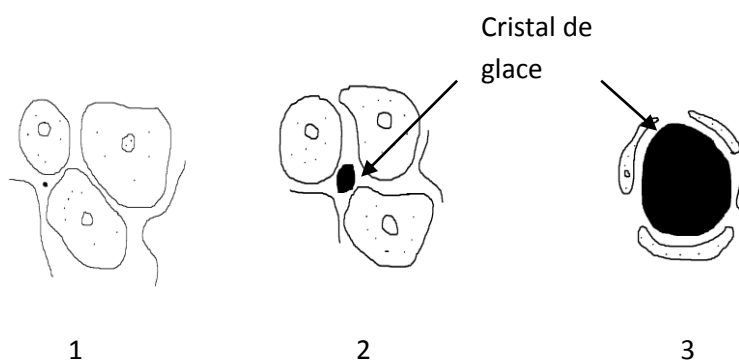
L'augmentation de volume est en général proportionnelle à la teneur en eau de l'aliment. La faible augmentation de volume des fruits entiers s'explique par la présence de gaz dans les vacuoles ; ces gaz sont comprimés et en partie expulsés lors de la congélation.

Dans le cas des fruits et légumes ces changements de volume, souvent non homogènes, provoquent des déchirures internes ; ils peuvent briser des parois cellulaires et par conséquent être la cause d'une perte de liquide lors de la décongélation ; ils peuvent aussi entraîner l'éclatement complet du fruit ou du légume, lorsque la congélation et l'expansion de l'intérieur interviennent après la formation d'une coque congelée externe. Une congélation trop rapide, notamment par immersion dans l'azote liquide, favorise d'autant plus cet éclatement que la couche externe congelée se contracte à très basse température.

➤ **Cristallisation extra et intracellulaire. Phénomène osmotique, rupture de membrane cellulaires et réaction enzymatiques**

La congélation d'un tissu débute par la cristallisation de l'eau des espaces extracellulaires, sans doute parce que la concentration en solutés y est moindre que dans les fluides intracellulaires.

Lorsque la congélation est lente ($< 1^{\circ}\text{C}/\text{mn}$), la cristallisation extracellulaire qui accroît la concentration locale en solutés, provoque une déshydratation progressive des cellules par osmose. De gros cristaux de glace se forment et élargissent les espaces extracellulaires, tandis que les cellules plasmolysées diminuent considérablement de volume. Cette déshydratation des cellules abaisse encore la probabilité d'une nucléation intracellulaire ; en fait, dans la plupart des tissus ou des suspensions de cellules congelés lentement, on n'observe pas de cristaux intracellulaires (à de rares exceptions près : cellules de plantes non résistantes au gel, légumes congelés après blanchiment, tissus congelés ne deuxième fois)



Le déplacement de l'eau qui peut devenir irréversible s'il dépasse un certain niveau, explique en grande partie la baisse de turgescence, le décollement des tissus et l'exsudation que l'on observe lors de la décongélation de nombreux aliments ; il est la cause principale de l'amollissement des tissus végétaux.

La rupture des parois cellulaires peut résulter de l'action mécanique des gros cristaux de glace (qui, dans les tissus végétaux, se forment en particulier dans la lamelle intermédiaire) d'un séjour prolongé dans un milieu hypertonique ou d'un rétrécissement excessif des cellules.

Lorsque la congélation est rapide, la cristallisation se produit à peu près simultanément dans les espaces extracellulaires et à l'intérieur des cellules (par nucléation autour d'organite cellulaires au travers des parois des cellules). Le déplacement d'eau est faible, et il se produit un très grand nombre de petits cristaux ; les modifications de texture liées à la sortie d'eau des cellules par osmose sont nettement moindres que lors de la congélation lente.

Au microscope on observe que les membranes végétales sont moins endommagées lorsque la congélation est rapide. Dans le cas des fruits, ou du moins de certains fruits, la congélation rapide respecterait davantage la texture, contrairement à ce qui se produit avec les légumes préalablement blanchis.

III.2.4.3. Modification des aliments pendant l'entreposage à l'état congelé

Les aliments congelés ne sont pas inertes ; leur qualité baisse progressivement au cours de l'entreposage en raison de modifications chimiques et physiques.

❖ Durée d'entreposage

Le tableau 12 indique approximativement les durées maximales de conservation que l'on peut atteindre pour divers aliments, tout en maintenant leur qualité à un niveau satisfaisant (dans des conditions adéquates d'emballage).

Tableau 12 : Durée maximale d'entreposage de quelques fruits et légumes à diverses températures.

Fruits et légumes	-30°C	-18°C	-12°C	-7°C
	Mois			
Jus d'oranges	-	10	4	-
Fraises (avec sucre)	-	12	2.4	0.3
Haricots verts	24	10	3	1
Petits pois	24	10	3	1
Epinards	24	10	<3	0.7

En principe, la température d'entreposage devrait être choisie pour chaque produit en fonction de la durée de conservation prévue, qui dépend des délais de transport, de la cadence de renouvellement des stocks, etc. En pratique c'est une température de -18°C qui a été retenue pour la plupart des aliments.

Il faut rappeler que l'entreposage avant congélation peut constituer une étape critique pour la qualité du produit final ; dans le cas de produits végétaux qui sont le siège d'une respiration intense après la récolte, un refroidissement immédiat est indispensable.

❖ Réactions de détérioration

Certaines des détériorations intervenant lors de l'entreposage des aliments congelés sont catalysées par des enzymes ; c'est le cas principalement du brunissement enzymatique des fruits que l'on conserve à l'état cru. L'addition d'acide ascorbique, de sucre ou d'anhydride sulfureux permet d'inhiber ce brunissement tant avant qu'après la congélation. La plupart des légumes doivent être blanchis avant congélation, en particulier parce que diverses enzymes gardent une certaine activité même à très basse température.

Parmi les réactions enzymatiques dont les aliments congelés peuvent être le siège, on doit mentionner l'oxydation des lipides (petits pois), de la vitamine C (fraise), de pigments caroténoïdes, d'arômes. La dégradation de pigments caroténoïdes (fraise) ou de chlorophylle (épinard, haricots verts, chou) constitue aussi un facteur limitant la durée d'entreposage.

III.2.4.4. Procédés de congélation

III.2.4.4.1. Congélation par l'air

❖ Chambres de congélation

Le produit est placé dans l'air stagnant maintenu à -20 ou à -30°C. L'épaisseur de produit qui est ainsi congelée est de l'ordre de 0.2 cm à l'heure. La durée de congélation peut ainsi varier, selon le produit, de quelques heures à plusieurs jours. Ces conditions sont peu favorables pour la qualité de l'aliment, et très peu employées dans l'industrie.

❖ Tunnels de congélation

Une congélation plus rapide, de l'ordre de 3 cm à l'heure, peut être obtenue dans des tunnels (ou des chambres), où circule de l'air à une température de -20 à -45°C, à des vitesses pouvant atteindre 50km/h. L'opération peut être continue : les produits avancent sur une bande transporteuse ou sur des chariots, à contre-courant avec l'air. Des tunnels de ce type sont employés par exemple pour la congélation des pommes de terre frites ; la durée de congélation est d'environ 20minutes.

❖ Congélateur à lit « fluidisé »

Lorsque le produit à congeler est constitué de particules relativement petites en une couche d'environ 15 cm d'épaisseur, il suffit de faire passer l'air froid, de bas en haut, à une vitesse linéaire supérieure à 6 km/h pour que le produit soit soulevé, agité et comme on dit « fluidisé ». Des petits pois, des haricots verts coupés, des pommes de terre frites, des fraises peuvent ainsi être congelés en 6 à 15 minutes dans de l'air à -35°C, sans risque de voir les morceaux se coller les uns aux autres. En raison de la grande vitesse de congélation, la déshydratation demeure faible.

III.2.4.4.2. Congélation par contact indirect

Le produit, emballé ou non, est congelé par contact avec une surface métallique maintenue froide par circulation d'un fluide réfrigérant (saumure, ammoniac, divers fréons, etc.). Dans le cas de l'ammoniac, les appareils sont conçus pour que l'ammoniac liquide s'évapore au contact de la plaque, qui constitue ainsi l'évaporateur.

❖ Congélateur à plaques

Le produit à congeler est comprimé entre deux plaques de métal, disposées horizontalement ou verticalement. Chaque plaque, ou plus exactement chaque élément réfrigérant, est constitué – comme dans un pasteurisateur à plateaux – de deux feuilles de métal formant une sorte de récipient parallélépipédique de très faible épaisseur, à l'intérieur duquel circule le fluide réfrigérant. La congélation d'un produit de 5 cm d'épaisseur exige environ 2 heures, ou davantage s'il y a beaucoup d'air entre le produit et l'emballage.

❖ Congélateur à tambour et tubulaires

Dans le cas de produits liquides ou semi-pâteux (purée, jus concentrés), la congélation peut être réalisée très rapidement, avec une couche mince de produit. On utilise soit un tambour tournant à axe horizontal, dont la partie inférieure passe dans une auge contenant le produit à congeler, et à l'intérieur duquel circule le fluide réfrigérant ; soit un échangeur de chaleur tubulaire, dont la surface interne, constamment raclée, est refroidie par un fluide réfrigérant qui circule dans un manchon externe. Dans le cas du tambour un couteau racler permet de récolter le produit congelé sous la forme d'un film ou de flocons ; avec l'échangeur tubulaire le produit n'est congelé que jusqu'à consistance pâteuse, de façon à pouvoir être pompé et conditionné, après quoi un refroidissement supplémentaire en complète le durcissement.

III.2.4.4.3. Congélation par contact direct avec un fluide réfrigérant

En raison du contact avec l'aliment, le fluide doit présenter diverses propriétés : absence de toxicité, absence d'odeur et de saveur, faible pénétration dans l'aliment, absence de réactivité envers ce dernier, faible viscosité, capacité thermique élevée, faible corrosivité vis-à-vis de l'appareillage, mais peu de fluide répondent à toutes ces conditions.

❖ Solution à bas point de congélation

L'aliment est congelé dans un bain liquide froid, lui-même réfrigéré par contact indirect avec un fluide réfrigérant, tel que ammoniac ou fréon. Pour les fruits on a employé des solutions de saccharose, mais pour pouvoir descendre à -21°C il faut un sirop 62% p/p très visqueux à cette température. C'est pourquoi on s'est adressé à des solutions de saccharose et chlorure de sodium, à des solutions aqueuses de chlorure de calcium (-51°C à 29.6%), de glycérol (-39°C à 70%), de propylène glycol (-51°C à 60%).

Au lieu d'immersion dans un bain réfrigérant, on peut refroidir le produit sous des douches, ou dans un brouillard.

Malgré certains avantages : rapidité, bas prix, facilité de mise en œuvre, possibilité de traiter des produits de formes diverses, l'immersion directe dans des solutions n'est plus guère utilisée, sauf parfois pour la congélation des sardines.

❖ Liquide cryogénique à très bas point d'ébullition

L'aliment est congelé par contact direct avec un liquide dont l'évaporation assure l'action réfrigérante. A l'heure actuelle on emploie surtout l'azote liquide, par pulvérisation (car l'immersion risque de provoquer les cassures).

La congélation à l'azote liquide est donc très rapide, ce qui permet souvent d'obtenir des produits de très bonne qualité. La déshydratation est inférieure à 2%, avantage important avec des aliments de prix élevé ; il y a également peu d'exsudation lors de la décongélation. Enfin, si l'aliment est emballé correctement et rapidement, il est à l'abri de l'air, ce qui réduit les risques d'oxydation pendant l'entreposage.

L'utilisation de procédés de congélation de ce type n'est vraiment intéressante que si le produit soit entreposé entre -23 et -30°C . en effet, 3mois d'entreposage à -18°C suffisent à

faire perdre, aux fraises par exemple, le gain de qualité organoleptique par rapport à la congélation « classique ».

III.3. Déshydratation

III.3.1. Introduction

Le séchage ou dessiccation est l'un des plus anciens procédés de préservation des aliments. Dans les aliments déshydratés, du fait d'une faible activité de l'eau, les micro-organismes ne peuvent pas proliférer, et la plupart des réactions chimiques et enzymatiques de détérioration sont ralenties.

On entend généralement par déshydratation (et la lyophilisation constitue une des méthodes de déshydratation) un procédé permettant d'enlever, par vaporisation ou sublimation, la majeure partie de l'eau d'un aliment liquide ou solide. La concentration (par évaporation osmotique, centrifugation, pressage mécanique, extraction d'eau par solvant) n'enlève au contraire qu'une certaine proportion de cette eau et ne suffit généralement pas par elle-même à assurer la préservation de l'aliment. La concentration est surtout employée pour des aliments liquides (potages concentrés, concentrés de tomate, concentré de jus de fruits, mais aussi de confitures) et constitue parfois une étape préalable à la déshydratation. La déshydratation consiste à évaporer une partie de l'eau d'un aliment, puis à congeler ce dernier ; le prix de la congélation et du transport sont abaissés. Ce procédé, relativement peu utilisé, est employé surtout pour les jus d'agrumes et certains fruits et légumes.

Les procédés de déshydratation peuvent être classés en trois catégories principales :

- Séchage par l'air, ou par contact, à la pression atmosphérique. La chaleur est apportée à l'aliment soit par l'air chaud (convection), soit par une surface chaude (conduction). Dans tous les cas, la vapeur d'eau formée se mélange à l'air, qui constitue ainsi le milieu servant à enlever la vapeur.
- Séchage sous vide. Le procédé est avantageux par le fait que l'évaporation de l'eau est facilitée à pression réduite. Le transfert de chaleur est effectué soit par conduction, soit par rayonnement (chauffage diélectrique ou rayonnement à partir d'une surface chaude). La vapeur d'eau est généralement enlevée par condensation à l'état liquide ou par aspiration (éjecteur de vapeur).
- Cryodessiccation (lyophilisation). L'aliment est d'abord congelé, puis la glace qui s'y est formée est sublimée (transformée directement en vapeur d'eau), dans des conditions appropriées de température et de pression. La vapeur d'eau est enlevée le plus souvent par condensation à l'état de glace. Ce procédé en « phase solide » préserve particulièrement bien la structure de l'aliment.

III.3.2. Relation entre les paramètres du séchage et les caractéristiques de l'aliment

Une teneur élevée en eau accélère la vitesse initiale de séchage. Une concentration élevée en constituant polymériques tels que protéines, amidons – surtout gélatinisés – et en sucres amorphes augmente la proportion d'eau liée et prolonge la deuxième phase du séchage. Avec les pommes de terre par exemple, on n'observe pratiquement pas de phase de déshydratation à vitesse constante. Au contraire les sels et les sucres cristallins, et les lipides, n'absorbent que

très peu d'eau : la première phase du séchage peut alors prendre proportionnellement plus d'importance.

Le transfert de vapeur d'eau pendant la première phase du séchage est proportionnelle à l'étendue de la surface de l'aliment. Deux demi-cubes sécheront donc environ 1.33 fois plus vite qu'un cube unique de même poids. Pendant la deuxième phase du séchage, le fractionnement des aliments favorise encore plus la vitesse de séchage. En pratique, étant donné la sensibilité thermique des aliments et la température maximale utilisable, une vitesse raisonnable de séchage ne peut être obtenue que pour une épaisseur de produit inférieure à environ 5 cm.

Lors d'un séchage initial très rapide (air de séchage présentant une forte différence entre la température « sèche » et la température « humide »), la vapeur d'eau peut être enlevée de la surface du produit plus vite qu'elle ne se déplace du centre du produit vers la surface. Ces conditions entraînent parfois une forte contraction de la couche sèche superficielle qui oppose alors une résistance considérable au passage ultérieur de la vapeur. Dans le cas des fruits, la formation de cette croûte est due en partie au comportement des sucres (formation d'un verre amorphe). Afin de ralentir l'évaporation, on peut utiliser un air d'humidité relative assez élevée et de vitesse faible. Une température relativement élevée du produit doit cependant être maintenue afin d'accélérer la diffusion interne de l'eau.

Lorsqu'on sèche des légumes coupés, il n'y a pas de risque de formation de croûte, et il est alors avantageux de sécher très rapidement. En effet, si le séchage initial est lent, le transfert interne de matière du centre vers la surface se fait sous la forme d'eau liquide, et non de vapeur d'eau. Des substances solubles dans l'eau, sels et sucres surtout, sont entraînées vers l'extérieur de l'aliment où elles se concentrent et finissent par cristalliser ou former une couche collante et imperméable qui ralentit considérablement le passage de la vapeur d'eau. La formation d'une couche externe concentrée provoque toutefois par osmose des phénomènes dans le sens opposé : appel d'eau vers l'extérieur et migration de substances solubles vers l'intérieur où la concentration est moindre.

Les tissus végétaux ont une structure hétérogène (couches de lipides et fibres diversement orientées, membranes cellulaires et épidermes plus ou moins perméabilisés par le blanchiment). Ces caractères influencent également le comportement à la déshydratation.

Lorsqu'un aliment est soumis à la déshydratation, il se contracte, en rapport avec la sortie progressive d'eau hors des cellules. Cette contraction est surtout notable lorsque la déshydratation est lente, et se produit malgré la résistance des éléments structuraux des tissus.



Contraction d'un fragment d'aliment au cours de la déshydratation

Diverses réactions de détérioration à énergie d'activation relativement élevée interviennent dès que la température de séchage dépasse un certain niveau. Il s'agit surtout du brunissement non enzymatique, qui est encore accéléré du fait de l'élévation momentanée de concentration des solutés dans l'aliment. La vitesse de brunissement est maximale pour une activité de l'eau d'environ 0.6, et il convient de laisser séjourner l'aliment le moins longtemps possible dans cette zone au cours du séchage. L'emploi d'un procédé de déshydratation rapide (sécheur atomiseur, sécheur à lit fluidisé) est favorable à cet égard, ainsi que le réglage précis des températures de l'air dans les diverses sections d'un tunnel de séchage. Le brunissement non enzymatique modifie défavorablement la couleur, la saveur, la valeur nutritionnelle, et parfois aussi la capacité de réhydratation des aliments. Il est partiellement inhibé ou ralenti par l'emploi d'anhydride sulfureux, que l'on utilise par exemple pour la préparation de la purée déshydratée de pomme de terre.

D'autres phénomènes liés à l'opération de séchage limitent souvent la qualité des aliments déshydratés :

✚ La perte, par évaporation, de substances aromatiques volatiles. Cette perte dépend non seulement de la masse moléculaire et de la pression de vapeur de ces substances, mais aussi de leur solubilité dans l'eau. Les purées de légumes ou de fruits que l'on déshydrate sur sécheurs à tambour sont mélangées au préalable à de l'amidon ou à des dextrans : cela permet en premier lieu d'éviter le comportement thermoplastique ; d'autre part la rétention des substances aromatiques est nettement améliorée.

✚ La diminution de la capacité de rétention d'eau, qui se manifeste à la réhydratation. Cette diminution peut être due à une dénaturation et à une agrégation de protéine sous l'effet de la chaleur, de l'augmentation de la concentration en sels, et de la désorption d'eau ; elle peut aussi résulter de la destruction des gels (pectines, amidons), ainsi que de modifications de la pression osmotique causées par la destruction des membranes cellulaires. Il n'est donc pas possible de retrouver après réhydratation la texture craquante d'une laitue, ou la turgescence d'un fragment de tomate.

✚ La perte de valeur nutritionnelle : certaines vitamines (A et C) peuvent être partiellement détruites par oxydation au cours du séchage par l'air chaud. La disponibilité nutritionnelle des résidus de lysine peut être abaissée par le brunissement non enzymatique.

III.3.3. Entreposage des aliments déshydratés

Diverses réactions de détérioration peuvent se produire au cours de l'entreposage des aliments à l'état déshydraté : développement d'insectes, en premier lieu, contre lequel des précautions général d'hygiène, ainsi qu'un emballage protecteur, sont nécessaires ; croissance de certains micro-organismes, ensuite, qui ne peut se faire qu'à l'occasion d'une reprise d'humidité. Un emballage imperméable à la vapeur d'eau, ou l'entreposage dans des conditions hygrométriques convenables, sont donc nécessaires.

A l'état déshydraté, les réactions enzymatiques, le brunissement non enzymatique, diverses réactions d'hydrolyse, la recristallisation des sucres avec prise en masse, ne se produisent que très lentement à condition bien entendu que le bas niveau de l'activité de l'eau atteint à la fin du séchage soit maintenu à l'aide d'un emballage approprié. Il est important également que la température d'entreposage reste inférieure à 25°C. des opérations préalables

au séchage, telles que le blanchiment ou l'addition de sulfites, lorsqu'elles sont possibles, peuvent améliorer la stabilité de certains aliments déshydratés.

Du fait de leur porosité, les aliments déshydratés sont particulièrement sensibles aux réactions d'oxydation, qui représentent souvent le facteur limitant leur conservation. L'emballage sous vide ou sous azote, dans un matériau imperméable à l'oxygène, et à la lumière, est parfois nécessaire pour éviter l'oxydation des lipides, et pour protéger certains pigments, vitamines, substances aromatiques.

III.3.4. Appareils et procédés de séchage

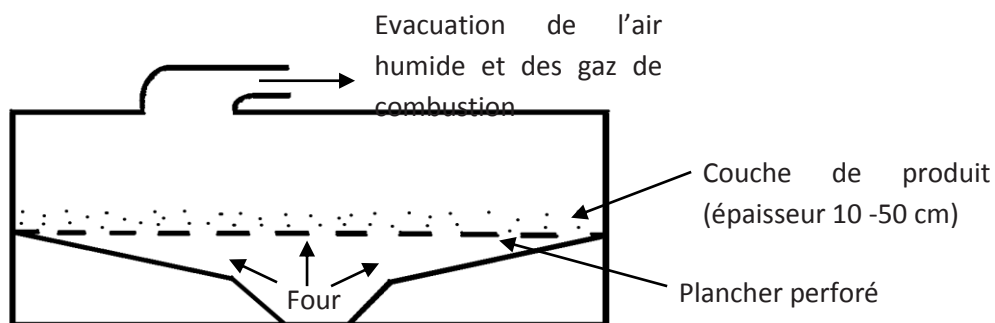
Une classification des procédés peut être donnée selon que la déshydratation soit effectuée à la pression atmosphérique ou sous vide, et selon que le transfert de chaleur se fait par convection, par conduction ou par rayonnement. Ces procédés sont d'une importance économique inégale ; certains de ceux qui font appel à l'air chaud, et le séchage par atomisation, sont les plus employés dans l'industrie alimentaire.

D'autres critères permettent de différencier les divers procédés et appareils : **1)** la forme et l'état de dispersion du produit : solide, film liquide plus ou moins visqueux (sècheur à tambour), aérosol (sècheur à atomisation). **2)** le mouvement du produit ou du fluide ou des deux ; un tel mouvement permet un séchage plus rapide et plus uniforme. **3)** L'opération, continue ou discontinue. L'opération continue, qui exige des appareils plus coûteux, ne se justifie que dans le cas d'une production importante et d'une durée de séchage courte. **4)** Le recyclage partiel de l'air, qui améliore l'efficacité calorifique, assure un séchage plus uniforme. **5)** Le mode de chauffage de l'air : direct, par mélange avec des gaz de combustion (avec risque de contamination par du combustible incomplètement brûlé) ou indirect.

Le choix d'un procédé de séchage dépend des caractéristiques physiques (solide de taille plus ou moins grande, liquide plus ou moins visqueux) et chimiques (sensibilité à la chaleur ou à l'oxydation par l'air) du produit. Certains produits peuvent être déshydratés en deux étapes, par deux procédés différents (sècheur tunnel puis lyophilisation).

III.3.4.1. Four à air chaud

Le séchage de tranches de pommes, se fait souvent dans un four à air chaud de grandes dimensions. Un débit rapide d'air et une agitation de la couche de produit assure un séchage plus uniforme aux divers niveaux d'épaisseur.



Four à air chaud

III.3.4.2. Sécheurs à plateaux

L'aliment est étalé en couche mince sur des plateaux. Il est chauffé, soit par des étagères chauffantes, soit plus fréquemment par de l'air chaud (2 à 6 m/sec) circulant entre les plateaux. L'air est recyclé, surtout en fin de séchage. Un séchage plus uniforme est obtenu s'il est possible d'inverser de temps à autre les sens de circulation de l'air. Ce type d'appareil polyvalent est peu coûteux ; dans les appareils de petite taille, l'air est chauffé par des résistances électriques plutôt que par échange indirect de chaleur avec de la vapeur ou des gaz de combustion.

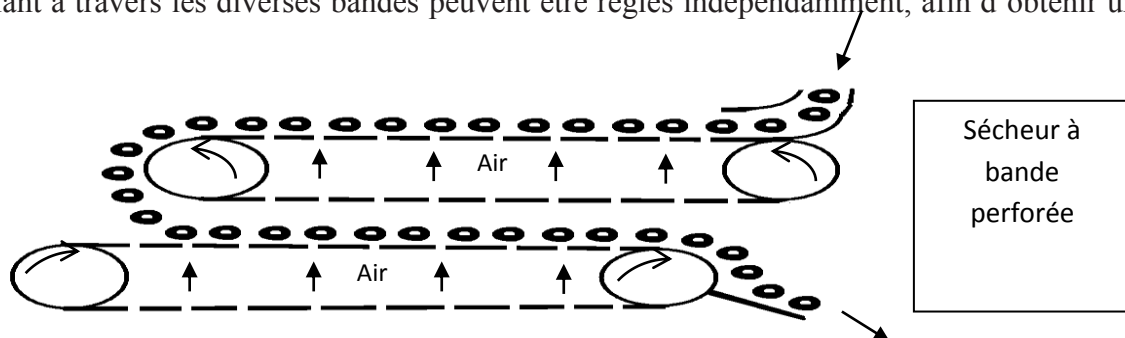
III.3.4.3. Tunnels de séchage

Comme dans l'appareil précédent, le produit peut être placé sur des plateaux ; ces plateaux sont eux-mêmes disposés sur des chariots, qui parcourent un tunnel où circule de l'air chaud (2 à 8 m/sec). L'opération de séchage est continue, et peut être entièrement automatisée.

Un tunnel de séchage comprend fréquemment deux sections : une première où l'air circule dans le même sens que le produit ; une seconde où il circule à contre-courant. On peut ainsi associer l'avantage d'un séchage initial rapide à celui d'une faible teneur finale en eau. A chaque position dans le tunnel correspondent une température et une humidité du produit (et de l'air) toujours constantes. Un bon réglage permet d'accélérer le séchage, d'éviter les dommages thermiques ou la croissance de microorganismes, etc.

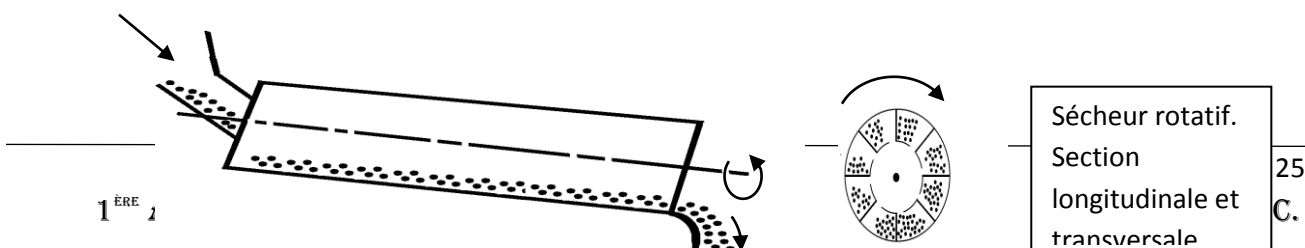
III.3.4.4. Sécheur à bande perforée mobile

Ces appareils sont le plus souvent des sécheurs à tunnel où le produit, à l'état divisé et en couche plus ou moins épaisse, est entraîné par une bande métallique perforée. L'air chaud peut circuler parallèlement au produit, mais le plus souvent il est envoyé perpendiculairement à la bande perforée et traverse la couche de produit. Le séchage est alors particulièrement uniforme, d'autant plus que le mouvement du produit est souvent accentué par un parcours de zigzag sur plusieurs bandes disposées l'une au dessus de l'autre. Les paramètres de l'air circulant à travers les diverses bandes peuvent être réglés indépendamment, afin d'obtenir un sécl



III.3.4.5. Sécheurs rotatifs

Dans ces appareils, le produit progresse, tout en étant agité, à l'intérieur d'un cylindre rotatif légèrement incliné.



Le produit doit pouvoir s'écouler facilement. L'apport de chaleur est assuré par une circulation d'air chaud (dont la vitesse doit être suffisamment faible pour ne pas entraîner les particules de produit), ou par conduction à partir de la paroi de l'appareil. Le séchage est rapide et uniforme. Ces appareils sont utilisés pour le séchage du sucre, des fèves de cacao etc.

III.3.5. Lyophilisation

La lyophilisation consiste en une transformation directe (sublimation) de la glace d'un aliment congelé en vapeur d'eau, sans passage par le stade de l'eau liquide.

La lyophilisation comprend trois étapes principales :

A. la congélation.

Les principaux avantages de la lyophilisation tiennent au fait que la déshydratation se fait en milieu totalement solide, et à basse température. Il n'y a donc pas de mouvement de liquides et de solutés, pas de contraction de volume, pratiquement pas de réactions chimiques ou enzymatiques.

Pour que ces avantages se manifestent effectivement, il est nécessaire que la majeure partie de l'eau de l'aliment soit congelée ; il faut aussi que la température de la partie congelée de l'aliment reste suffisamment basse (inférieure à environ -20°C) pendant la lyophilisation, afin d'éviter la fusion des eutectiques (ce phénomène risque surtout de se produire dans les aliments riches en sucres).

Avec certains, il peut être utile de ne pas congeler l'aliment trop rapidement. La présence de cristaux de glace de taille assez élevée se traduit, après sublimation, par la présence de pores de même taille, qui facilitent le passage de la vapeur d'eau, et plus tard la réhydratation.

En pratique l'aliment est souvent congelé dans l'enceinte même du lyophilisateur, par exemple par circulation d'un fluide réfrigérant dans les plateaux. On congèle parfois l'aliment par évaporation, sous vide, d'une partie de l'eau (avec de l'eau pure, l'évaporation de 12% de l'eau enlève une quantité de chaleur correspondant à la congélation du reste).

Dans le cas de solutions, on pratique souvent la congélation en faisant tourner le récipient partiellement rempli, de façon à former sur ses parois une mince pellicule glacée ; la lyophilisation ultérieure en est accélérée.

B. la dessiccation primaire

La dessiccation primaire correspond à la sublimation de toute l'eau congelée de l'aliment. La vitesse de cette dessiccation est proportionnelle à la différence entre les pressions partielles de vapeur d'eau de la glace se trouvant, respectivement, au niveau du front de sublimation, et sur le condenseur. Cette différence de pression dépend directement de la température entre le produit encore congelé et le condenseur. Avec un produit à -20°C (P_w

glace = 0.776 torr) et un condenseur à -40°C (P_w glace = 0.097 torr), la différence de pression est de 0.679 torr ; elle serait de 1.664 torr avec un condenseur à -30°C et un produit à -10°C , mais une telle température du produit risquerait d'entraîner la fusion de certains eutectiques.

Les très faibles différences de pression de vapeur mises en jeu expliquent le fait que la vitesse de lyophilisation est toujours faible. La résistance au transfert de vapeur augmente très nettement (et la vitesse de la déshydratation diminue) lorsque la pression dans l'enceinte du lyophilisateur s'élève. C'est pourquoi on opère le plus souvent sous vide, à une pression absolue comprise entre 0.1 et 2 torrs (la pression absolue devrait idéalement être proche du tiers de la pression partielle de vapeur d'eau au niveau du front de sublimation). Même dans ces conditions, la vitesse de déshydratation dépasse rarement $1.5 \text{ kg d'eau/m}^2\cdot\text{h}$. Cette valeur correspond à une vitesse de déplacement du front de sublimation de 2 à 3 cm en 10 heures. En pratique les produits à lyophiliser ont une épaisseur inférieure à 2-3cm.

Que la vitesse de déshydratation soit limitée par le transfert de vapeur ou par le transfert de chaleur, l'épaisseur de la couche sèche, et donc aussi l'épaisseur totale du produit, jouent un rôle primordial ; la durée de déshydratation est en effet approximativement proportionnelle au carré de l'épaisseur. Ceci explique d'ailleurs la diminution progressive de la vitesse de déshydratation au cours de la lyophilisation.

C. la dessiccation secondaire

A la fin de la dessiccation primaire, il n'y a plus de glace, et par conséquent pas de risque de fonte si la température s'élève. La température du produit « sec » s'élève d'ailleurs spontanément, puisque la chaleur de sublimation n'est plus enlevée. Une telle élévation de température est indispensable pour que l'humidité résiduelle, correspondant à l'eau fortement liée, puisse s'évaporer. En pratique, on maintient le produit à une température de $20 - 70^{\circ}\text{C}$, toujours sous vide, pendant 2 à 6 heures. Il est souhaitable d'amener l'aliment à une teneur en eau 2 à 8% environ) correspondant à la couche monomoléculaire, teneur en eau assurant une stabilité maximale pendant l'entreposage ; le contrôle de la teneur en eau en cours de lyophilisation est difficile.

Si la température du produit sec dépasse un certain niveau, il peut y avoir brunissement non enzymatique, destruction de pigments, dénaturation de protéines, fusion et migration de lipides, et effondrement de sa structure poreuse (dû à la cristallisation de sucres), avec relâchement de substances volatiles aromatiques. On peut noter que les paramètres de lyophilisation peuvent être réglés de manière à minimiser la perte de substances aromatiques.

En fin de lyophilisation, le vide est généralement cassé par entrée d'azote. Cette façon de procéder, associée à un emballage adéquat, protège contre diverses oxydations auxquelles les aliments lyophilisés sont particulièrement sensibles.

A raison de son prix élevé, la lyophilisation est beaucoup moins utilisée dans l'industrie alimentaire. Les aliments que l'on lyophilise sont surtout le café en poudre, les champignons les fragments de viande ou de légumes pour potage déshydratés, les framboises, certains jus de fruits. Il s'agit surtout d'aliments assez onéreux, et pour lesquels il est économiquement intéressant de préserver le plus possible la qualité organoleptique. La lyophilisation est en

effet la technique de déshydratation qui respecte le plus la forme, la texture, la couleur, l'arôme et la capacité de réhydratation de ces aliments.

Les aliments lyophilisés sont très hygroscopiques et poreux, ce qui impose un emballage rigoureusement étanche, sous vide. Cela contribue à leur prix élevé.

Exemples de schémas de fabrication de conserves : les schémas de fabrication ci-après donnent une idée de l'enchaînement des opérations.