

Polycopié du Cours

TECHNIQUES DE CONSERVATION

2^e Année Master

Agroalimentaire & Contrôle de Qualité

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ BOUIRA

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCE DE LA TERRE

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Polycopié du Cours

TECHNIQUES DE CONSERVATION

2^e Année Master

Agroalimentaires & Contrôle de Qualité

Document préparé par :

Dr.CHEKROUNE Malika Maitre de Conférences-B

Année universitaire : 2022/2023

Module : Techniques de Conservation

Enseignante Mme CHEKROUNE M.

AVANT –PROPOS

L'enseignement des techniques de conservation vise à fournir les informations nécessaires concernant : les différentes méthodes de conservation des aliments, les principes des méthodes de conservation, les avantages apportés ainsi que les limites d'applicabilité de chaque méthode. La composition de la matrice alimentaire joue un rôle très important dans le choix de la méthode.

Pratiquement tous les aliments qui rentrent dans la nourriture humaine sont périssables. D'où l'intérêt de leurs préservation par les différentes méthodes dont l'objectif d'augmenter leur durée de vie.

Les technologies alimentaires ont considérablement progressé. L'essor actuel des produits surgelés, crus, cuits, plats cuisinés, et plus récemment encore produits de 4^{ème} gamme et de 5^{ème} gamme, montrent à quel point aujourd'hui les traitements de conservation sont intégrés dans l'utilisation quotidienne des denrées alimentaires.

Le présent document est un support de cours et servira comme un guide pour les enseignants, mais il est surtout destiné aux étudiants de 2^e année Master Filière Sciences Alimentaire ; spécialité : Agro -alimentaire et Contrôle de Qualité. Il a pour but d'apporter aux étudiants les éléments suffisants mais aussi nécessaires de cours d'une matière essentielle: Techniques de conservation.

Dans ce document, les différents points cités dans le canevas de master agro-alimentaire et contrôle de qualité concernant le programme du module techniques de conservation seront traités.

TABLE DES MATIERES

Avant-propos

Chapitre 1. Les différentes altérations alimentaires

1-oxydation des lipides.....	1
2- brunissement non enzymatiques (réactions de Maillard).....	1
3-réactions enzymatiques.....	1
4-développement de microorganismes.....	2

Chapitre 2 . Principes et méthodes de conservation

I.Les principes de conservation.....	3
1. Les méthodes basées sur le principe de biose.....	3
2.Les méthodes basées sur le principe d’anabiose.....	3
3.Les méthodes basées sur le principe d’abiose.....	3
II. Les différentes méthodes de conservation des aliments.....	3
1.La réfrigération et la congélation.....	3
1.1.La réfrigération.....	3
1.2.La congéation.....	4
1.3.La surgélation.....	5
1.4.Cinétique de congélation.....	5
1.5.Inconvénients de la congélation.....	5
1.6.La décongélation.....	6
2. Le séchage.....	6
3-La lyophilisation.....	20
4.La Stérilisation thermique.....	22
5.La Fermentation.....	23
6.Les agents conservateurs.....	23
7. Les solutions concentrées.....	26
8. Le fumage.....	27

9. Les atmosphères modifiées.....	27
10.Les rayonnements.....	28
11.La pascalisation.....	28
Références bibliographiques	

Chapitre 1 : Les altérations alimentaires

I. Les différentes altérations alimentaires

La stabilité de l'aliment dépend de l'activité de l'eau a_w . Les différentes altérations alimentaires rencontrées sont :

1-L'oxydation des lipides

Le rancissement des lipides représente l'une des principales réactions très rapide de détérioration des aliments à faible ou moyenne teneur en eau. Le rancissement des lipides résulte de l'action de l'oxygène sur les acides gras non saturés.

Parmi les conséquences de l'oxydation de lipides : la production de composés volatils à odeurs indésirables, destruction des vitamines liposolubles par les radicaux libres et les peroxydes, formation de composés toxiques, baisse de la solubilité et la digestibilité et de la valeur nutritionnelle des protéines, effet sur la texture des aliments protéiques, brunissement non enzymatique des composés carbonylés non saturés produits.

2 Le brunissement non enzymatique (réactions de Maillard)

Ce type d'altération est du à : des condensations entre composés à fonction carbonyle et composés à groupement aminés, dégradation de composés carbonylés à doubles liaisons conjuguées (acide ascorbique et les réductones). Le brunissement non enzymatique permet d'aboutir à la formation de polymères bruns participant ainsi à la diminution de la valeur nutritionnelle. Ce type de réactions peut être désirables ou indésirables.

Les composés à fonction carbonyles peuvent être formés par l'hydrolyse acide du saccharose ou d'autres glucides. Cette réaction peut avoir lieu même à des activités d'eau très basses et à des pH neutres.

L'acide ascorbique des légumes, des jus de fruits concentrés ou des poudres d'agrumes, peut subir des réactions de brunissement grâce à la dégradation de Strecker. Il peut de plus être décomposé en produits de type furfural.

La vitesse du brunissement s'accélère par la chaleur et avec l'augmentation de l'activité de l'eau (entre 0,5 et 0,7). Au-delà de 0,7 la vitesse du brunissement décroît, c'est-à-dire se sont les aliments à teneur moyenne en eau qui sont altérés par le brunissement non enzymatiques.

3-Les réactions enzymatiques

Les réactions enzymatiques sont conditionnées par l'activité de l'eau. L'activité enzymatique, et le taux final d'hydrolyse, s'élèvent considérablement lorsque l'activité de l'eau dépasse 0.7. Il est possible que cela corresponde à un accroissement de la phase aqueuse liquide et donc de la proportion de substrat atteint par cette phase, capable de se dissoudre, et de diffuser vers l'enzyme.

4-Le développement de microorganismes

La croissance des microorganismes s'observe à des teneurs en eau élevées. La valeur optimale de croissance est située entre 0.92 et 0.99. Le tableau suivant donne la valeur minimale de l'activité de l'eau pour les différents micro-organismes :

Tableau 1: valeurs minimales d'activité d'eau pour la croissance des micro-organismes

Micro-organisme	L'activité de l'eau minimale pour la croissance
Bactéries	0.91
Levures	0.88
Moisissures	0.80
Bactéries halophiles	0.75
Moisissures xérophiles	0.65
Levures osmophiles	0.60

Les espèces de bactéries pathogènes et toxigènes se multiplient pratiquement à des activités d'eau supérieures à 0.90.

En ce qui concerne le pH, en général les bactéries se développent à des pH non extrême. Le tableau suivant donne les valeurs de pH de développement des micro-organismes :

Tableau 2 : Valeurs de pH de développement des micro-organismes

pH	Organismes		
	Bactéries	Levures	Moisissures
minimum	4.5	2.5	<2
maximum	12	8-9	6-7
optimal	6-7	4-5	3

Chapitre 2 : Principes et méthodes de conservation

I- Les principes de conservation

En utilisant les principes biologiques de la classification de Nikitinskovo, les méthodes de conservation peuvent être divisées en trois principaux groupes. Ces principes ne sont pas appliqués séparément, mais dans chaque méthode de conservation il y a un principe qui domine.

1- Les méthodes basées sur le principe de biose :

Ce principe se base sur le maintien du métabolisme de la matière première et l'utilisation de son immunité naturelle, par l'application d'un ensemble de mesure garantissant une préservation de courte durée de la matière première à l'état frais.

2- Les méthodes basées sur le principe d'anabiose

Ce principe se base sur le ralentissement du métabolisme aussi bien microbien que celui du produit par l'emploi de facteur physique, chimique et biologique. Les méthodes rencontrées dans ce principe sont : la réfrigération, la congélation, le séchage, le marinage, la fermentation...

3- Les méthodes basées sur le principe de l'abiose :

Ce principe se base sur l'arrêt complet de tous les métabolismes aussi bien de la matière première que dans les micro-organismes.

II- Les différentes méthodes de conservations des aliments

1. La réfrigération et la congélation :

1.1. La réfrigération

Appelé également froid positif. C'est le stockage des aliments à des températures basses mais supérieures à 0°C. Elle permet de ralentir le métabolisme des micro-organismes et par conséquent la durée de conservation est de quelques jours.

La conservation par réfrigération est particulièrement à prendre en considération dans le domaine de la restauration collective.

Pour assurer une plus longue durée de conservation, les températures de réfrigération doivent être respectées (voir tableau)

Tableau 3 : les températures de réfrigération de quelques aliments

Température	Denrées
Maximum +20°C	Conserves appertisées
Maximum +15°C	Charcuteries, semi-conserves de produits de la pêche, fromage avec croûte, œufs, autres denrées stables
Maximum +10°C	Toutes les semi-conserves (sauf produits de la pêche)
+5 à +15°C	Huîtres, moules, autres coquillages
+6 à +10°C	Fruits, légumes frais, boissons
0 à +8°C	Fromages à pâte molle et à pâte persillée
0 à +6°C	Produits laitiers frais non stérilisés
0 à +4°C	Volailles, lapins, gibiers, charcuteries non stables
0 à +3°C	Abats, viandes de boucherie découpées, pâtisseries, crèmes pâtisseries, plats froids, plats cuisinés
0 à +2°C	Poisson frais

Il est important de savoir que :

-la réfrigération ne fait que ralentir le développement de micro-organismes ; la charge bactérienne de départ doit donc être faible et le produit doit être sain,

La réfrigération permet :

- ralentissement important des processus biochimiques ayant lieu dans la matière première.
- réduction de l'activité microbienne.

1.2.La congélation

C'est le stockage des aliments à des températures négatives jusqu'à une température de -20°C avec changement d'état d'eau liquide en glace. La durée de conservation est de quelques mois.

L'entreposage des aliments est généralement effectué à -18°C.

1.3. La surgélation

C'est la congélation rapide des produits à une température inférieure ou égale à -18°C (jusqu'à -40°C), puis stocké à cette même température.

Elle est appliquée à des aliments de faible épaisseur de façon à ramener la température à cœur le plus rapidement possible à -18°C . Le maintien de la température de stockage à -18°C est impératif

1.4. Cinétique de congélation

La congélation lente provoque la formation de gros cristaux de glace qui entraînent une compression mécanique tendant à écraser les cellules (figure 1).

La congélation rapide correspond à la formation d'un grand nombre de petits cristaux de glace. L'altération de l'intégrité cellulaire et tissulaire est moins marquée.

Lors de la décongélation, les produits congelés rapidement exsudent beaucoup moins que les produits congelés lentement.

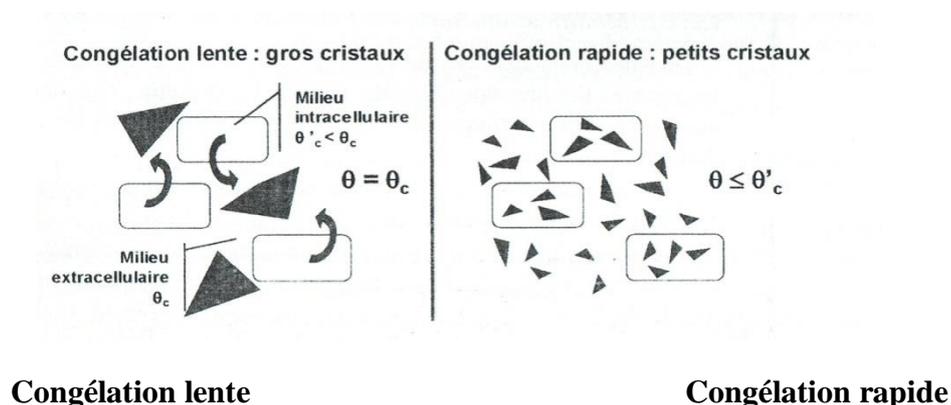


Figure 1: influence de la vitesse de congélation sur la structure des produits

L'application du froid, qu'il soit positif ou négatif, ne détruit pas les micro-organismes. Il s'ensuit que la charge bactérienne de départ du produit ainsi conservé se retrouve à la même valeur lors d'une remise en température plus élevée.

1.5. Inconvénients de la congélation

Parmi les inconvénients de la congélation est l'altération des structures cellulaires, ainsi que des modifications physico-chimiques lors des processus de congélation et de décongélation.

Ces effets sont dus notamment à la taille des cristaux, à la localisation de la cristallisation (intra ou extra cellulaire), à l'augmentation de volume du produit et à l'augmentation de concentration des substances dissoutes lors de la congélation.

La congélation laisse toujours une partie d'eau libre résiduelle fonction de la température atteinte par le produit (10 à 20% à -20°C et plus bas).

L'augmentation du volume dû à la formation de glace provoque l'endommagement des cellules ce qui entraîne une exsudation à décongélation.

1.6.Décongélation

La qualité des produits congelés ou surgelés dépend de la qualité du procédé de congélation appliqué et de la qualité du procédé de décongélation également.

La décongélation est plus lente que la congélation. La couche superficielle d'un produit décongelé contient de l'eau sous forme liquide et se trouve à 0°C plus longtemps. L'exposition à une telle température a comme conséquence une augmentation de la concentration en solutés et une augmentation de la taille des cristaux de glace avec les conséquences que cela peut avoir sur les qualités organoleptiques.

Par ailleurs, du fait de l'exsudation, et du fait de l'élévation de température, la couche superficielle est l'objet d'un développement bactérien, notamment de bactéries psychrophiles, raison de ne jamais recongeler un produit décongelé.

Méthode de décongélation :

-L'aliment congelé peut subir une cuisson directe (produits coupés en petit morceaux).

-l'aliment congelé subit une décongélation au réfrigérateur à une température inférieure à 4 °C (produits de taille importante).

2-Le séchage

2.1.Définition

Nous reproduisons la définition donnée par certains auteurs et selon laquelle « le séchage est l'opération ayant pour but d'éliminer, par évaporation, l'eau d'un corps humide (solide ou liquide), le produit final obtenu étant toujours un solide ».

Notons aussi que le procédé de séchage utilisé à des fins de conservation mais aussi de formulation est très ancien, la stabilisation des denrées étant obtenue par abaissement de l'«activité de l'eau ».

2.2.Principes physiques du séchage

Deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit : l'ébullition ou l'entraînement. L'idée la plus simple consiste sans doute 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.

2.2.1 Séchage par entraînement

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

- Le gaz 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 vers le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz.

Un exemple, typique du début de séchage d'un produit très hydraté, est donné en figure (2) 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). On note dans l'exemple de la figure (2) que la température de surface du produit est nettement inférieure à la température d'ébullition de l'eau et à la température de l'air de séchage.

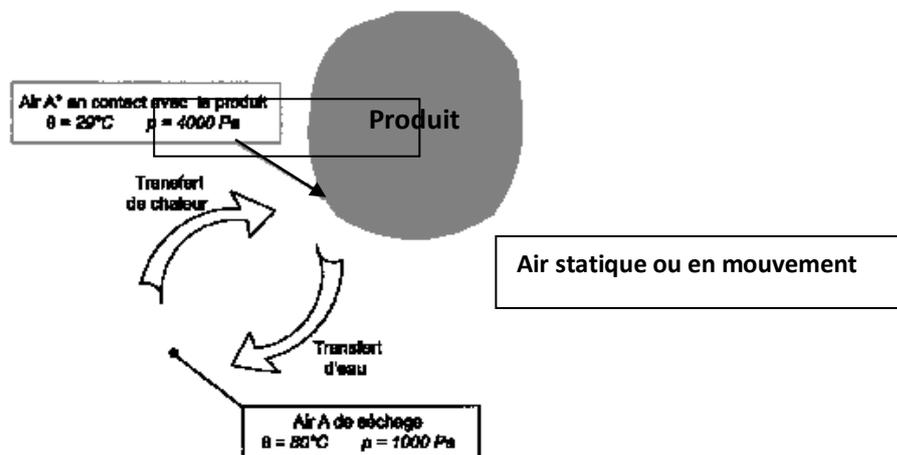


Figure 2 : Représentation schématique des échanges de matière et de chaleur lors d'un séchage par entraînement

Dans le cas où toute l'énergie est apportée au produit par convection à partir de l'air chaud et où il n'y a pas de perte de chaleur, le séchage est dit *isenthalpique* ; l'énergie nécessaire à la vaporisation est exactement celle apportée par l'air chaud. La température à laquelle se met le produit ne dépend que des caractéristiques de l'air et de l' a_w de la surface du produit.

2.2.2. Séchage par ébullition

L'ébullition a lieu lorsque la température du produit est élevée à une valeur telle que la pression de vapeur d'eau de ce produit est égale à la pression totale ambiante :

$$P = P_i$$

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), selon la formule : $p = a_w \cdot p'_\theta = p_t$ Où p'_θ est la vapeur saturante de l'eau pure à la température θ .

2.3. Produits agricoles et alimentaires séchés

Il y a lieu de faire une distinction entre :

➤ Les produits fortement hydratés naturellement, comme par exemple les fourrages (luzerne, graminées, trèfle), les pulpes de betteraves, les fruits (pruneaux d'Agen), les légumes verts, le lait, les jus de fruits, etc., pour lesquels le titre en eau est supérieur à 70 %, ce qui nécessitera au cours du séchage l'évaporation d'une masse d'eau 2 à 4 fois supérieure à la masse de produit sec obtenu.

➤ Les produits relativement peu hydratés à la récolte, comme par exemple le maïs, pour lequel la proportion d'eau à retirer représente environ le tiers de la masse de produit sec, ou les céréales (blé tendre, blé dur, orge), les oléagineux (colza, tournesol), récoltés occasionnellement ou régulièrement humides, pour lesquels la masse d'eau à évaporer par séchage est encore plus faible. Le tableau IV suivant résume les principaux produits séchés.

Tableau 4: Principaux types de produits agricoles et alimentaires séchés

PRODUITS AGRICOLES PEU HYDRATES (SECHAGE COMPLEMENTAIRE STABILISATION)	CEREALES, OLEAGINEUSES, ETC. GRAINES
Produits agricoles très hydratés (allègement et stabilisation)	Lait et dérivés, fruits et légumes, plantes aromatiques et médicinales, viandes et poissons, œufs et dérivés, etc.
Produits issus de transformations industrielles (stabilisation et présentation)	Extraits de café et de thé, pâtes alimentaires, charcuteries, sauces, sucres, etc.
Sous-produits industriels	Pulpes de betteraves, drêches de brasserie, lactosérum, etc.

2.4. Les fruits séchés

-Conservation et innovation

Les fruits pulpeux (prunes, raisins, pommes, abricots, cerises, fraises, bananes, figes, mangues...) sont relativement riches en eau et en sucres. Il en résulte que leur conservation en l'état à température ordinaire est généralement difficile. Les fruits à coque (noix, noisettes, amandes, pistaches, noix de coco et de cajou...) bien que moins hydratés et moins riches en sucres, ne se conservent pas non plus très très longtemps en l'état, même si leur vitesse de détérioration est moindre que celle des fruits pulpeux.

Le séchage a constitué, depuis les origines de l'homme, la façon la plus simple de permettre cette conservation (ce que l'on a appelé plus tard : «la réduction des pertes post-récolte»). Le séchage s'est effectué longtemps à l'air et/ou au soleil. Les techniques ont évolué mais le principe demeure. Nous définirons le séchage comme consistant à éliminer l'eau d'un produit par évaporation (y compris la sublimation) de celle-ci. Outre l'effet de conservation, le séchage conduit à une perte de poids, une caractéristique intéressante pour certains usages, comme on le verra plus loin. Enfin, le séchage n'est pas neutre par rapport à la partie non aqueuse du produit : les fruits ne se comportent pas comme une éponge ou une serpillière que l'on peut mouiller et faire sécher de ombreuses fois sans qu'elles évoluent sensiblement ! Les fruits, surtout les fruits charnus, sont profondément modifiés par le séchage. Cela apparaît clairement lorsqu'on les réhydrate après séchage : ils ne retrouvent généralement ni la forme, ni l'aspect, ni la texture en bouche des fruits frais. Cette grande question sera discutée dans ce chapitre. A l'inverse, on peut considérer qu'un fruit sec est un produit différent du fruit frais, la comparaison n'ayant pas à être faite. C'est en particulier le cas de ceux qu'on ne réhydrate qu'en bouche : il s'agit de produits à la texture particulière du fruit sec (moelleuse ou croustillante), au goût différent (souvent plus sucré) de celui du fruit frais / En ce sens le séchage apparaît comme un procédé permettant de conférer des propriétés nouvelles (pas seulement de conservation) à un produit. Dans cette voie, on verra plus loin que les fruits secs peuvent être enrobés, grillés ou frits, donnant des produits n'ayant plus à être comparés aux fruits frais.

En outre, on fabrique aussi des jus de fruits séchés, en poudre, ou des pulpes séchées, en paillettes. Dans les deux cas, des «supports» (souvent des maltodextrines ou des amidons) sont ajoutés pour faciliter le séchage et/ou pour améliorer la rétention des arômes.

Utilité des fruits séchés

Une partie des fruits séchés (entiers ou découpés) sont consommés directement, soit lors d'activités sportives où l'on recherche de l'énergie sous forme concentrée (randonnée, course de fond...) sans avoir à transporter l'eau, soit pour l'apéritif (ce qui peut sembler paradoxal, du fait de leur fort contenu énergétique). Ces formes de consommation concernent, soit des produits à base d'un seul fruit, soit des mélanges (exemple : le «mendiant», mélange amandes+noisettes+figues+raisins). Dans d'autre cas, les fruits secs sont utilisés en cuisine, plus ou moins réhydratés, avec ou sans cuisson (en salades, salades de fruits, plats du genre lapin aux pruneaux, couscous aux amandes...).

L'autre type d'utilisation des fruits secs est artisanal ou industrielle. Ces produits sont alors des produits alimentaires intermédiaires (PAI) et entrent, avec bien d'autres, comme ingrédients dans la formulation des aliments. Dans les cas les plus simples, ils servent à faire des mélanges, notamment pour apéritifs ou céréales de petit déjeuner. Les autres usages des fruits secs, qu'ils soient tels quels, grillés ou enrobés, en poudres ou en pulpes séchées, sont en pâtisserie (cakes, tartes...), barres céréalières, desserts lactés, confiseries, chocolaterie, boissons...

2.5. Les qualités attendues

La teneur en eau des fruits pulpeux est généralement de l'ordre de 70 à 85 %, celle des fruits à coque est plus faible (exemple : 30-50 % à la récolte, coque comprise, pour les noix en France; Laviaille, 1993 ; Laviaille et al, 1997). Les teneurs en eau des premiers ne permettent généralement pas la conservation à température ordinaire pendant des durées (quelques jours) permettant la distribution en frais (les pommes et les agrumes, peu concernés par le séchage,

constituent des exceptions). Or, de nombreux usages, tant ménagers qu'industriels, demandent une stabilité de plusieurs semaines ou mois. Les fruits à coque sont plus stables sous l'angle biologique, mais leur teneur élevée en lipides les amène à rancir en quelques semaines s'ils ne sont pas séchés. La première qualité des fruits secs est donc...d'être secs. Aucune norme, à ma connaissance, ne précise cette teneur en eau, sauf pour les pruneaux semi-humides, pour lesquels sont définies des catégories de teneur en eau devant être portées sur l'emballage.

La richesse des fruits en vitamines vient au premier plan de leur image nutritionnelle. Ce facteur est moins marqué pour ce qui concerne les fruits séchés. Cependant, les pertes en acides ascorbique (vitamine C) et en β -carotène (provitamine A) au séchage en fait l'objet de quelques études.

La composition des fruits secs (mises à part leurs teneurs en eau et en vitamines) ne semble pas être un élément important de leur qualité, dans la mesure où ces produits sont surtout consommés pour leurs qualités organoleptiques. Leur valeur énergétique est toutefois un critère de qualité, perçue positivement par les sportifs mais plutôt négativement par les consommateurs qui surveillent leurs poids. Les fruits secs posent peu de problèmes d'innocuité, si ce n'est la présence d'aflatoxines dans certains fruits importés. Les résidus de pesticides doivent aussi être surveillés (Cabras et al., 1998). Leurs teneurs en additifs et en résidus de pesticides font, pour l'essentiel, l'objet des mêmes règlements que les autres produits alimentaires. Au titre des qualités thérapeutiques, signalons que le pruneau est parfois consommé pour son effet laxatif.

Mais c'est aux qualités organoleptiques (aspect, texture, goût et arôme) des fruits séchés que s'intéresse le plus le consommateur, aussi bien au niveau ménager qu'industriel.

Les fruits secs sont généralement loin d'être microbiologiquement stériles. Cette contamination ne constitue normalement pas un problème pour le consommateur final, car à l'état sec, ces micro-organismes ne peuvent se développer. En revanche, les utilisateurs industriels, par exemple ceux qui incorporent ces fruits secs dans les préparations à conserver au froid pendant quelques semaines (plats cuisinés, yaourts, desserts) sont très concernés par cet aspect.

L'absence de corps étrangers (insectes, brindilles, fibres textiles venant de sac, poils ou déjections d'animaux...) fait, pour des raisons évidentes, partie des critères d'acceptation ou de prix des lots.

Enfin, l'aptitude des fruits secs à la réhydratation peut constituer pour certains usages, surtout industriels, un critère de qualité. Cette aptitude se décline en plusieurs éléments: vitesse de réhydratation atteinte (mesuré par la proportion ou la concentration d'eau reprise), qualités du produit réhydraté (notamment : forme, texture, couleur, goût...).

2.6. Critères de qualité

La qualité des fruits séchés reflète en premier lieu celle des fruits frais utilisés comme matière première, notamment leur espèce et leur maturité. Ces caractéristiques de départ sont ensuite modifiées par le séchage et le stockage, dans un sens généralement considéré comme défavorable (même si le fruit sec est si différent du produit humide que le consommateur le considère parfois comme un autre produit n'ayant pas à être comparé au fruit frais, comme par exemple le pruneau que personne ne pensera à comparer à la prune d'ente).

Pour le fruit, le séchage est appliqué comme :

- Une élévation de température.
- Une évaporation d'eau et d'autres substances volatiles.
- Des déformations liées à ce départ d'eau.

Le stockage représente :

- Des risques d'échanges de vapeur d'eau avec l'ambiance.
- Le maintien à une température proche de celle de l'ambiance, donc plus basse que lors du séchage, mais sur des durées bien plus longues.

On peut classer les phénomènes modifiant les propriétés des produits de la façon suivante, en signalant pour chacun les moyens d'action possibles :

2.7. Réactions biochimiques

De manière simplifiée, on a classé ces réactions de la manière suivante :

- Le brunissement enzymatique de certains fruits démarre lors de la coupe et s'arrête lorsque, par blanchiment ou échauffement dû au séchage, les polyphénoloxydases sont inactivées.
- Le brunissement non enzymatique, résultant des réactions de Maillard des sucres réducteurs avec les amino-acides, se produit peu ou prou lors du séchage en fonction des courbes temps/température et peut se poursuivre au cours du stockage.

Les vitesses de ces réactions sont liées à la température du produit, donc l'avancement de ces réactions dépend du temps autant que des températures. C'est ainsi, par exemple, qu'un séchage au cours duquel le produit est porté à 100°C, pendant 5 secondes seulement provoque peut être moins de réaction de Maillard que s'il a été maintenu à 50°C pendant une heure. De même, un stockage à 25°C sur des mois pourra entraîner plus de ces réactions que le traitement précédent. On observe cependant que les séchages à très basses températures (par exemple à l'air ambiant), donc très lents, provoquent en général moins de réactions de brunissement que les séchages à l'air chaud.

La teneur en eau joue un rôle important et complexe sur ces vitesses de réactions.

Ces deux phénomènes de brunissement ont évidemment des conséquences défavorables sur la couleur des fruits secs : une couleur claire est préférée. La maîtrise des températures et des durées de séchage est indispensable, en particulier pour éviter de laisser inutilement les produits secs dans l'air chaud du séchoir. L'autre solution consiste à ajouter de l'anhydride sulfureux (dans les limites autorisée), capable de ralentir les réactions de Maillard et le brunissement enzymatique (exemples : raisins blancs, type sultanine et abricots).

L'oxydation enzymatique ou non concerne surtout :

- Certains arômes,

- Les vitamines et provitamines (acide ascorbique et β -carotène),
- Les matières grasses dont le rancissement détériore l'arôme et le goût (exemple : cas des fruits à coques).
- Ces oxydations sont, elles aussi, accélérées par la température, mais aussi par la présence d'oxygène et par la lumière (Jayaraman et Das Gupta, 1995).

Les pectines, qui participent à la texture des fruits et font partie des fibres alimentaires, peuvent subir des dégradations enzymatiques avant, pendant et après le séchage (Femenia, 1998).

La dénaturation des protéines abaisse leur solubilité et leur pouvoir de rétention d'eau, ce qui intervient négativement lors de la réhydratation. Dans un autre sens, cela conduit à l'inactivation des enzymes, facteur favorable lors du séchage et de la conservation.

Cette dénaturation des protéines peut entraîner une certaine destruction thermique de micro-organismes, donc un assainissement du produit. Il ne faut toutefois pas considérer cet effet comme une pasteurisation, la destruction ne dépassant généralement pas une ou deux réduction décimales.

Selon les températures et teneurs en eau atteintes au séchage, mais plutôt au stockage, il peut se produire des développements de micro-organismes, notamment le développement de moisissures. C'est ainsi, par exemple, que la conservation des pruneaux semi humides et des dattes n'est pas assurée ce qui rend nécessaire l'addition d'un conservateur, l'acide sorbique. On notera à ce propos que ces produits peuvent être classés dans la catégorie des "aliments à humidité intermédiaire, AHI", dont la conservation nécessite des traitements combinés (ici : séchage+additif conservateur) comme tous les produits de cette catégorie.

De même, selon les conditions, peut survenir une gélatinisation de l'amidon (à savoir une désorganisation des grains d'amidon, l'empois se répandant dans les cellules).

Bien entendu, ces réactions se produisent au séchage, au stockage des fruits secs, mais aussi dans les phases de préparation avant séchage (on l'a vu pour le brunissement enzymatique).

-Perte d'arôme

Les arômes étant constitués de molécules volatiles, on pourrait s'attendre à ce qu'ils soient évaporés en même temps que l'eau lors du séchage. C'est en partie le cas, mais curieusement (et heureusement) moins que leur volatilité pourrait le faire craindre : on constate parfois des pertes de 20 ou 30% seulement pour des molécules plus volatiles que l'eau (alors que celle-ci est éliminée à 90%). Ce phénomène a longtemps intrigué les chercheurs. On a fini, dans les années soixante-dix, par comprendre que la volatilité n'était pas seule à jouer, mais qu'intervenait aussi l'aptitude des molécules d'arômes à diffuser plus ou moins facilement dans le milieu. Ce peut être l'intérêt de la formation d'une croûte sèche autour du produit (qui par ailleurs a l'inconvénient de ralentir le séchage) de retenir ainsi les arômes. On peut jouer sur ce phénomène en séchage de jus de fruits concentrés.

Comme signalé plus haut, les molécules aromatiques peuvent être oxydées au séchage et au stockage. D'une part, les réactions de Maillard produisent des goûts «de chauffé», voire de brûlé ou de caramélisé qui, évidemment masquent les arômes des fruits.

- Aspects mécaniques

Du fait du départ d'une proportion d'eau généralement importante, le séchage génère de grandes déformations des fruits pulpeux qui prennent une forme ratatinée à laquelle sont habitués les consommateurs. La lyophilisation fait exception à ce phénomène.

Dans le cas du pruneau, le séchage débute par un gonflement pouvant entraîner une fissuration de la peau, avec écoulement de jus.

Les fruits à coques, eux, sont moins humides au départ et, en outre, sont séchés le plus souvent dans leur coque. Les déformations sont donc moins fortes et moins visibles. Le problème dans ce cas est celui du «bâillement», à savoir l'ouverture partielle des coques, ce qui les fragilise, entraînant des risques de casse au calibrage et au conditionnement.

La texture des fruits secs surtout celle du produit frais initial, liée à leur espèce et leur maturité, mais aussi à leur teneur en eau. Les teneurs en eau plus élevées qui donnent aux fruits à pulpe des textures plus molles, souvent appréciées, entraînent, en plus des problèmes de conservation, le désavantage de fournir des fruits collants ce qui peut constituer un inconvénient de présentation.

2.8. Réhydratation

La plus grande partie des fruits secs est consommée sans réhydratation, si ce n'est dans la bouche. Utilisés en cuisine, ils reprennent leur eau et une bonne réhydratation est souhaitée. Il en va de même pour les quelques usages industriels (exemple en pâtisserie) où les fruits sont réhydratés. Dans quelques cas (pruneaux, dattes), les produits, obtenus et conservés à basse teneur en eau, peuvent être réhydratés avant commercialisation.

Ces opérations de réhydratation de fruits sont plutôt lentes, pour les raisons indiquées plus haut : déformations des fruits (avec écrasement de cellules) et dénaturation des protéines. Les constituants pectiques des parois, s'ils ont conservé leur grand pouvoir d'hydratation, jouent probablement un rôle important.

Une perte de constituants solubles est inévitable lors de cette réhydratation et conduit à la génération de solutions sucrées qu'il faut traiter ou que l'on peut récupérer.

Dans le cas des fruits secs mélangés aux céréales de petit-déjeuner, il est au contraire souhaité qu'ils gardent leur fermeté ou leur craquant pendant quelques minutes après immersion dans le lait.

D'une façon générale, la relation entre les conditions de séchage et l'aptitude à la réhydratation n'est pas simple. Les seuls faits bien établis sont que la lyophilisation et le séchage sur cylindre, deux procédés de séchage par ébullition, fournissent des produits poreux se réhydratant très bien.

2.9 .Moyens d'action sur les modifications

Les moyens d'action sur les modifications citées en haut sont nombreux, mais souvent limités par des contraintes techniques ou économiques :

➤ Choix, tri, préparation de la matière première, ainsi qu'emploi de certains prétraitements (blanchiment et addition de SO₂ pour ralentir les réactions de Maillard et l'action des enzymes) ;

➤ Limitation des couples temps-température subis par le produit. On constate que pour abaisser la teneur en eau au niveau nécessaire à la bonne conservation, un traitement à basse température pendant un temps long provoque moins de réactions que le traitement opposé. Il est important de limiter le "surséchage", appliqué en fin d'opération pour assurer la teneur en eau finale ; c'est le moment où le produit atteint la température de l'air (ou de la source chaude). Eviter le collage du produit aux parois. Préférer le co-courant air- produit au contre-courant, car dans ce second cas, le produit le plus sec est mis en contact avec l'air le plus chaud.

➤ Eviter les fissurations, provoquées par des séchages trop rapides, en jouant sur la température d'air et son humidité.

➤ Concernant la rétention d'arômes, il se trouve que la diffusivité des petites molécules organiques diminue plus vite que la diffusivité de l'eau lorsque la teneur en eau diminue. C'est ainsi qu'en fin de séchage, la mobilité réduite des arômes les pièges dans le produit, malgré leur volatilité. Pour obtenir cet effet sur la plus grande partie possible du séchage, on ajoutera, quand c'est possible, de la matière sèche (par exemple des maltodextrines) à la matière première ;

➤ Sur le plan de l'hygiène, on constate que le séchage ne détruit que peu de micro-organismes (à savoir, peu de réductions décimales) : on peut dire qu'il n'aseptise pas. En revanche, le produit peut être contaminé par l'air et par le passage dans des zones infectées : la filtration de l'air est utile, de même que des nettoyages périodiques du matériel.

7. Problèmes techniques attachés au séchage

Citons les deux principaux problèmes techniques rapportés par la littérature scientifique attachés au séchage sont :

➤ Le risque d'altération de la forme, de la texture et des qualités nutritionnelles et organoleptiques du produit ;

➤ La consommation énergétique considérable : le séchage absorbe, en France, 14% de la consommation énergétique industrielle, 40% de l'énergie consommée en séchage étant imputable aux IAA (Nadeau et Puiggali, 1995). On estime que le secteur agroalimentaire consacre 60% de sa consommation d'énergie au séchage (Maffart, 1996).

2.10.L'équilibre d'humidité entre l'air et le produit

La première grandeur qui caractérise l'état d'hydratation d'un produit est sa teneur en eau (X), exprimée en Kg d'eau par Kg de matière sèche, qui mesure la quantité totale d'eau dans le matériau. Dans la pratique toutefois, les industriels utilisent souvent une mesure de l'humidité du produit rapportée à la masse totale de produit : fraction massique X_w , souvent exprimée en pourcentage, aussi appelée "teneur en eau sur base humide" ou "humidité du produit". Pour faire des bilans et dimensionner les opérations de séchage, il est préférable de travailler sur la base de la matière sèche, constante lors du séchage.

Dans les faits, un solide n'est jamais isolé ; il est entouré d'une atmosphère contenant de la vapeur d'eau, avec laquelle il échange des molécules d'eau. L'intensité de ces échanges dépend de l'écart à l'état d'équilibre thermodynamique entre les deux phases. Cet état d'équilibre est caractérisé par la notion d'*activité de l'eau* a_w , qui représente la capacité de l'aliment à retenir l'eau dans sa structure et à la maintenir pendant l'application de forces extérieures.

On considère fréquemment que l'eau existe dans un matériau sous forme d'eau «libre» ou d'eau «liée». La première est une eau retenue dans les espaces interstitiels et les pores par des forces de capillarité liées à la tension superficielle du liquide ; elle correspond à l'état capillaire et présente des propriétés semblables à celles de l'eau libre ($a_w=1$). La seconde est adsorbée par des forces de cohésion plus importantes avec la matrice solide et/ou avec les autres molécules d'eau (forces physico-chimiques de type Van der Waals, liaison hydrogène ou autres) ; elle correspond à l'état hygroscopique ($a_w<1$) et ses propriétés sont différentes de celles de l'eau libre.

On distingue aussi parfois l'eau de constitution, qui entre dans la structure intime du produit (celle qui reste après passage à l'étuve, l'état «sec» étant un état conventionnel de référence qu'il faut définir par un protocole expérimental).

La nature des liaisons entre l'eau et le matériau se répercute sur le procédé de séchage et surtout sur la qualité du produit sec. Une bonne connaissance des phénomènes permet d'interpréter les résultats des cinétiques : une représentation fiable de l'équilibre est nécessaire pour contrôler le procédé quel que soit le principe physique du séchage.

D'une manière très schématique, on peut dire que le point de conservation optimale des produits biologiques, sans additif ni réfrigération, correspond à une activité de l'eau comprise entre 0.25 et 0.35.

2.11.Périodes, cinétiques et température de séchage

Etant donnée la très grande variabilité des produits alimentaires et biologiques, le meilleur moyen de caractériser le comportement au séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage. Dans le cas d'un produit solide séché par entraînement, l'expérience de base consiste à placer le produit en question dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (θ , y , vitesse v_a v_a) et à enregistrer l'évolution de sa masse au cours du temps, par des pesées à intervalles de temps réguliers. D'autres techniques sont envisageables (analyse de l'humidité de l'air sortant notamment) ; elles ont été décrites et analysées par Kemp et al. (2001).

-Les périodes de séchage

Trois types de courbes permettent de décrire l'évolution du produit au cours du séchage :

➤ La teneur en eau moyenne (X) du produit, rapportée à la quantité de matière sèche, en fonction du temps (t) et obtenue directement à partir de l'enregistrement de la masse au cours du temps, connaissant la teneur en eau initiale du produit.

➤ La vitesse de séchage ($-d X/d t$) en fonction du temps, obtenue en dérivant la courbe précédente ;

➤ La vitesse de séchage ($-d X /d t$) en fonction de la teneur en eau (X), parfois appelée courbe de Krisher.

Les courbes théoriques, typiquement obtenues pour des produits non hygroscopiques et peu déformables comme la cellulose, le bois, l'argile ou le plâtre sont représentées sur la figure (3) Sur les courbes, on distingue classiquement trois périodes :

➤ Une période 0 de mise en température du produit, qui disparaît pratiquement lorsque le produit est en particules ou en feuilles.

➤ Une période 1 de séchage à vitesse constante, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, son a_w en surface reste proche de 1 et le séchage est contrôlé par les transferts externes. Pendant toute cette période, la température du produit est uniforme et égale (par définition) à la température humide (θ_h) de l'air. La fin de cette période 1 permet de définir la teneur en eau critique (X_{cr}) du produit.

➤ Une période 2 de séchage à vitesse décroissante. La surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l' a_w en surface devient inférieur à 1 et les transferts internes de matière deviennent limitants. La température du produit augmente alors à partir de sa surface. La teneur en eau du produit diminue jusqu'à atteindre une teneur en eau limite (X_{lim}) qui dépend des conditions (θ et ϕ) de l'air de séchage, X_{lim} se déduit de l'isotherme de désorption (à cette température θ et correspond à la valeur de X pour laquelle $a_w = \phi$.

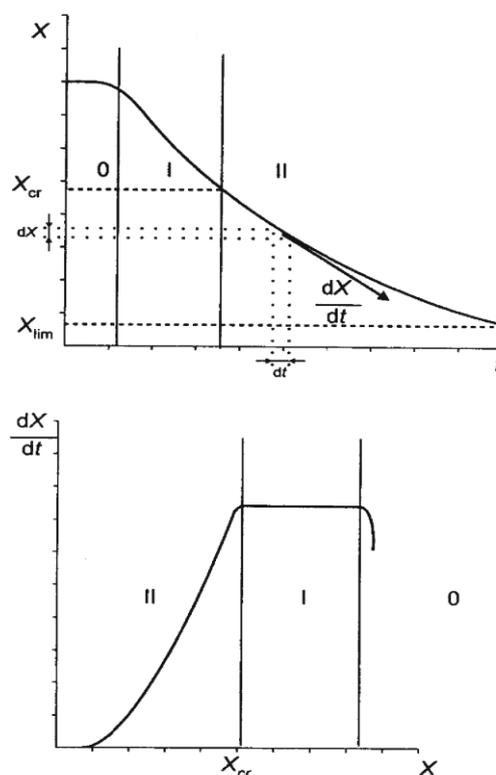


Figure 3 : Courbes théoriques caractérisant un essai de séchage par entraînement

Pour les produits alimentaires et biologiques, on n'observe en général pas de période de séchage à vitesse constante. La migration d'eau interne est limitée par la résistance des parois cellulaires, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le durcissement et la rétraction de la surface du produit. Cette période de séchage à vitesse décroissante est souvent divisée en deux ou trois sous périodes, qui correspondent à des changements structuraux dans le matériau.

Dans tous les cas, une augmentation de la température de l'air de séchage se traduit par une augmentation du potentiel de séchage et par une accélération du procédé. La plupart du temps, les résistances externes sont négligeables et le séchage est contrôlé par les résistances internes au transfert de matière. En réalité, cela dépend de la valeur de la vitesse de l'air de séchage : à faible vitesse, les résistances internes et externes au transfert de matière sont comparables, alors qu'au-delà d'une certaine valeur critique de v_a , le procédé est contrôlé par le transport interne.

Pendant la première phase du séchage (phase à vitesse constant de séchage), la présence d'eau libre à la surface du produit est constamment assurée par l'arrivée d'eau liquide provenant de l'intérieur. Pendant la seconde et troisième phase du séchage, il n'y a plus d'eau libre, respectivement à la surface puis même à l'intérieur du produit, et l'eau se déplace du centre vers la surface sous forme de vapeur.

Le transfert d'eau à travers l'aliment est considérablement ralenti vers la fin du séchage parce que l'épaisseur de la couche sèche augmente et parce que la diffusivité de l'eau, ou la perméabilité de la vapeur, à travers cette couche sèche diminuent au fur et à mesure que baisse la teneur en eau.

Dans le cas de séchage à la pression atmosphérique, on considère que c'est le passage de la vapeur d'eau à travers une mince couche d'air stagnant située à la surface du produit qui constitue la principale résistance au transfert.

L'application d'un courant d'air de vitesse élevée permet de diminuer l'épaisseur de cette couche stagnante, et donc d'éviter la formation d'un gradient d'humidité dans l'air au contact du produit. Un tel courant d'air peut être obtenu par aspiration au-dessus d'un sécheur cylindre, ou par ventilation de l'air chaud de séchage dans le cas d'un tunnel de séchage ou d'un sécheur atomiseur.

La vitesse de chacune des phases du séchage dépend en grande partie des caractéristiques propres de l'aliment.

Une teneur élevée en eau accélère la vitesse initiale de séchage. Une concentration élevée en constituants 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 proportionnel à l'étendue de la surface de l'aliment. Deux demi-cubes sècheront 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.

2.12. Les Prétraitements

Après réception du fruit, on doit sans délai procéder aux opérations de préparation dont la succession et la nature diffèrent trop d'un fruit à l'autre pour que l'on puisse les présenter de façon générale : tri, nettoyage à sec, lavage, calibrage, pelage mécanique ou thermique, découpage, dénoyautage, épépinage, décoquage.... La préparation des purées et des jus concentrés ajoute à ce genre d'opérations de préparation des phases de cuisson ou de concentration par évaporation.

Viennent ensuite souvent des traitements physicochimiques, à savoir :

➤ La sulfitation qui est effectuée sur des fruits à pulpe (comme le raisin blanc, l'abricot, la pomme), pour limiter les brunissements et les oxydations au cours du séchage et du stockage. On procède par fumigation dans la fumée de soufre brûlé ou mieux, car cela permet de maîtriser les doses, par trempage dans une solution de sulfite de sodium. Une grande partie du SO₂ est éliminée au séchage et il reste en général largement moins que les 2000 ppm autorisés pour la plupart des fruits.

➤ Le blanchiment, consistant en un bref traitement thermique (quelques minutes à l'eau bouillante ou à la vapeur), est destiné à inactiver les enzymes catalysant le brunissement ou les oxydations lors du séchage et du stockage. Ce traitement perméabilise les parois cellulaires ce qui accélère le séchage et peut aussi désaérer les tissus, donc réduire encore les risques d'oxydation. Bien entendu, cela ramollit le produit, ce qui peut être un inconvénient et, surtout dans le cas du blanchiment à l'eau, extrait une partie des solutés du fruit avec génération d'une eau résiduaire chargée en sucres. En fait, le blanchiment, couramment utilisé pour les fruits et légumes destinés à la surgélation et à l'appertisation, est plus rarement effectué sur des fruits avant séchage.

➤ Le trempage dans des solutions alcalines (Nury et al., 1978 ; Jayaraman et Das Gupta, 1995), appliqué notamment au raisin, est destiné à extraire la couche cireuse, peu perméable à l'eau et à fragiliser la peau. A la solution chaude (environ 90°C) de soude caustique ou de carbonate de sodium, on peut ajouter de l'oléate d'éthyle, dans le même but. Ces traitements, qui donnent lieu à de nombreuses recherches (exemple : Gabas et al., 1999), ont pour but d'accélérer le séchage. On mentionne également le trempage de fruits avant séchage dans des solutions sucrées pour mieux retenir la couleur et les arômes : par exemple, Srzednicki et al. (1998) préconisent une solution de tréhalose pour les cerises.

2.13. Le stockage

Les fruits secs sont conservés en trémies (donc en vrac) ou en gros emballages lorsqu'ils sont destinés à l'utilisation industrielle, ou en emballages de consommation pour la commercialisation vers les ménages. Dans tous ces cas, le stockage s'effectue à température ordinaire, puisque c'est justement l'intérêt du séchage de permettre ce mode de conservation. Cette température est plus ou moins élevée selon la zone géographique et la saison, avec des variations généralement lentes.

Le principal phénomène physique en jeu réside dans les échanges d'eau sous forme vapeur avec l'ambiance :

- Reprise d'eau si le degré hygrométrique de l'ambiance est supérieur à A_w du fruit.
- Perte d'eau si le degré hygrométrique de l'ambiance est inférieur à A_w du fruit.

Les pertes d'eau peuvent conduire à des textures trop dures et à des pertes de poids ce qui peut entraîner des difficultés commerciales. Les reprises d'humidité sont plus gênantes encore, en ce qu'elles peuvent provoquer le collage des fruits et des développements de moisissures, voire de levures.

D'où l'intérêt de conditionner les fruits dans des emballages étanches à la vapeur d'eau pour limiter ces échanges.

2.14. Définition des grandeurs mesurables

Sur la base de nos modestes connaissances sur la destruction thermique des micro-organismes, nous avons emprunté les concepts qui s'y sont appliqués pour justement décrire le comportement au séchage des fruits de datte. Nous avons en conséquence définie les concepts suivants :

- L'efficacité E du séchage. Nous la définissons comme :

$E = \log(X_0/X)$ où X_0 et X sont les teneurs en eau initiale et au temps t de séchage correspondant à $X = 5\text{g d'eau}/100\text{g(MS)}$ maximum fixée.

- L'effet du temps. Il est caractérisé par la constante D = le temps nécessaire pour passer de X_0 à $X_0/10$ à une température T de l'air de séchage donnée. En portant $\log(X/X_0)$ en ordonnées et le temps en abscisses on pourra écrire en recourant à la méthode des moindres carrés :

$\log(X/X_0) = -kt$ ou encore $\log(X_0/X) = kt = t/D = E$ = nombre de réductions décimales.

On voit bien qu'à $t = D$ on a $X = X_0/10$

- L'effet de la température. Il est caractérisé par la constante z = l'élévation de température nécessaire pour baisser D de 10fois : $\log D_0/D = \Delta T/z$

3-La lyophilisation

Appelée aussi la cryodessiccation. C'est le séchage par sublimation de l'eau, le produit est séché à l'état congelé sous vide profond. L'eau passe de l'état solide à l'état vapeur.

En conséquence la structure moléculaire du produit change peut et l'aliment acquiert une grande porosité et de ce fait les propriétés initiales de la matière première se reconstituent rapidement pendant le trempage.

La lyophilisation est un procédé de choix pour les produits thermosensibles car il permet une excellente restitution des qualités organoleptiques des produits traités. Cependant son caractère cyclique et son coût énergétique élevé sont des facteurs limitants au développement de son utilisation.

Les produits lyophilisés sauvegardent le volume initial, la couleur, la saveur et la valeur alimentaire.

Les installations de sublimation sont très complexe et consommatrice d'énergie. Un emballage hermétique pour la conservation du produit fini est obligatoire.

3.1.Les étapes de la lyophilisation

Les différentes étapes de la lyophilisation sont (voir Figure) :

3.1.1-la congélation A → B

Le principal avantage de la lyophilisation tient au fait que la déshydratation se fait en milieu totalement solide, et à basse température. Donc pas de réactions chimiques ou enzymatiques. Afin que ces avantages se manifestent effectivement, il est nécessaire que la majeure partie de l'eau de l'aliment soit congelée et la température reste suffisamment basse (inférieure à environ -20°C) pendant la lyophilisation.

Cette étape peut avoir lieu soit dans le lyophilisateur (congélation interne) par circulation d'un fluide réfrigérant dans les plateaux soit en dehors du lyophilisateur (congélation externe).

3.1.2- mise sous vide B → C

La mise sous vide n'est pas rigoureusement obligatoire.. On peut lyophiliser à pression atmosphérique avec un courant d'air ou d'azote froid, à la condition que la pression partielle de l'eau dans le gaz soit inférieure à la pression de la vapeur de la glace. Le vide a toutefois l'intérêt de réduire les risques de fusion de la glace et d'accélérer le séchage si le facteur limitant est la diffusion de la vapeur au travers de la masse de produit. Si le transfert de chaleur interne est limitant, comme c'est souvent le cas au début de lyophilisation, il st

intéressant de travailler à dans températures de sublimation basses, correspondant à des précisions comprises entre 40 et 140Pa, voire plus basses.

3.1.3- Sublimation C → D

La sublimation correspond à la dessiccation primaire de toute l'eau congelée de l'aliment. 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 10 et 270 Pa. L'épaisseur totale du produit joue un rôle primordial sur la vitesse de déshydratation, qu'elle soit limitée par le transfert de vapeur ou de chaleur

3.1.4- Désorption D → E

La désorption correspond à la dessiccation secondaire de l'eau liée. 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, puisqu'il n'y a plus de sublimation. Cette élévation de température est indispensable afin que l'humidité résiduelle, correspondant à de l'eau liée, soit désorbée et puisse s'évaporer

3.1.5- Cassage du vide E → F

En fin de lyophilisation, le vide est généralement cassé par introduction d'air ou d'azote, ce qui associé à un emballage adéquat permet de protéger de l'oxydation les produits lyophilisés.

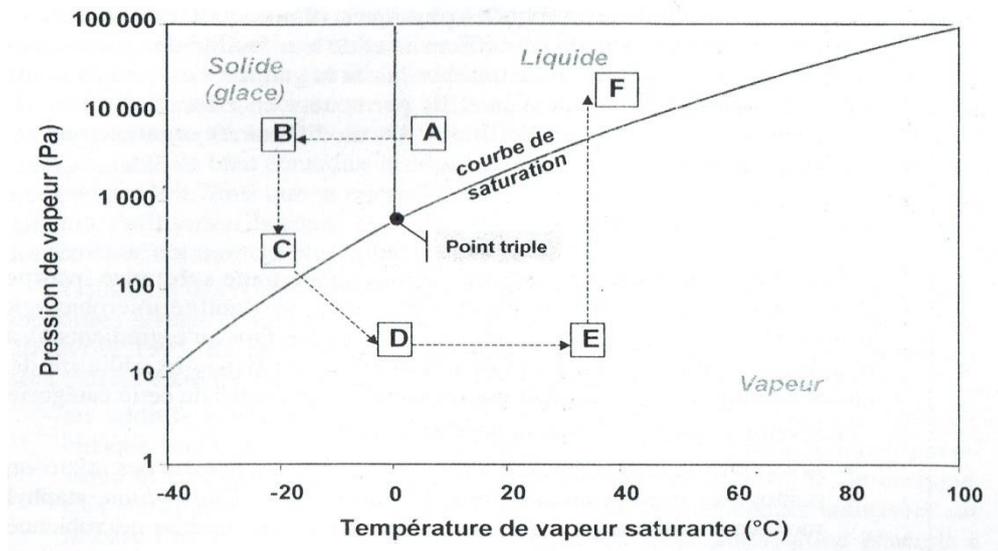


Figure 3: les étapes de la lyophilisation

4. La stérilisation thermique

La stérilisation thermique a été découverte par Nicolas Appert en 1809. Ce dernier avait en effet trouvé le moyen de conserver les aliments grâce à un traitement thermique élevé dans des récipients hermétiquement clos, ouverts seulement lors de leur utilisation.

La stérilisation thermique est un procédé qui est basé sur la destruction par la chaleur des bactéries, les spores bactériennes et enzymes présentes dans l'aliment et de maintenir ces derniers à l'abri de l'oxygène de l'air et à l'abri de toute contamination.

Altérations possibles des produits appertisés :

Les altérations des produits appertisés proviennent de deux causes :

a-un traitement de stérilisation insuffisant : mauvais barème de stérilisation, charge microbienne élevée au départ,

b-une contamination à posteriori (manque d'étanchéité du serti des boîtes, choc ultérieur).

L'altération microbienne d'un produit appertisé se traduit :

- la plupart du temps par un bombage de la boîte, il convient donc d'éliminer toute boîte bombée,

- à l'ouverture un sifflement caractérise le dégagement du gaz provenant du métabolisme bactérien,

Le danger majeur d'une altération microbienne dans une conserve appertisée est le botulisme, consécutif au développement de *Clostridium botulinum* dont les spores peuvent être thermorésistantes. Cette thermorésistance est prise en compte dans l'établissement des barèmes de stérilisation.

La toxicité due aux emballages est plus que réduite. Les matériaux utilisés pour les conserves appertisées sont le fer blanc, l'aluminium et le verre. Les boites en étain sont, pour la majeure partie des produits, revêtues d'un vernis intérieur qui bloque la migration éventuelle d'étain dans le produit alimentaire.

5 .La fermentation

La fermentation est une méthode de stabilisation biologique utilisée de puis l'antiquité. Les fermentations les plus exploitées sont les fermentations alcoolique, lactique, et acétique. La fermentation renforce la teneur en éléments nutritifs dans les aliments.

La fermentation renforce la salubrité des aliments en réduisant le risque d'apparition de composés toxiques tels que les aflatoxines et les cyanogènes, et en produisant des agents anti-

microbiens comme l'acide lactique, les bactériocines, le dioxyde de carbone, l'eau oxygénée et l'alcool éthylique qui facilitent l'inhibition ou l'élimination des agents pathogènes. [2]

Outre leur intérêt nutritionnel et leur rôle stabilisant, les fermentations enrichissent l'offre alimentaire en produisant une variété de saveurs, textures et arômes.

Les micro-organismes intervenant dans les fermentations sont de deux types : les bactéries (cas des fermentations lactique et acétique) et les levures (cas de la fermentation alcoolique) et moisissures (cas de certains type de fromage ex : camembert).

6.Les agents conservateurs

Le stockage de la matière première que ce soit en tant que matière première (après récolte) ou en tant que produit fini. doit se faire en préservant le plus longtemps possible un niveau de qualité satisfaisant et avec ralentissement des réactions d'altérations soit par l'une (ou combinaison) des méthodes de conservation soit par l'utilisation des agents conservateurs. Ces derniers peuvent agir :

6.1.-antibactériens et antifongiques : en modifiant les conditions du milieu (pH, a_w) et limitant ainsi le développement bactérien et d'accroître la stabilité du produit: antibactériens, antifongiques,...

6.1.1. Les antiseptiques

Ils ont la propriété de tuer les micro-organismes (en paralysant ses fonctions vitales grâce à leurs interactions avec les protéines du cytoplasme). Les antiseptiques idéaux doivent répondre aux exigences suivantes :

- être nocif pour les micro-organismes en faible dose,
- ces doses ne doivent pas être nocives pour l'organisme humain,
- ne doivent pas réagir avec les substances alimentaires,
- ne doivent attribuer aux aliments des odeurs ou des saveurs désagréables,
- ne doivent pas réagir avec les matériaux d'emballage,
- ils doivent être facilement éliminable avant consommation.

Un tel antiseptique n'existe pas

Le SO₂

L'acide sulfureux non dissocié H₂SO₃ et l'anhydride sulfureux SO₂ possède une action conservatrice en arrêtant la respiration des microorganismes. Le dioxyde de soufre SO₂ est utilisé pour la conservation des fruits, purée et jus de 0,15 à 0,20%. A cette concentration il est nocif aussi pour l'organisme humain et donne aussi un arrière-goût et une odeur désagréable pour le produit.

Le SO₂ est ajouté soit sous forme de solution aqueuse (acide sulfureux H₂SO₃) ou par injection du gaz à travers le jus ou la purée. La sulfitation est menée à basse température pour augmenter la solubilité du SO₂. Le SO₂ est facilement évaporé au chauffage.

6.1.2.Les antibiotiques

Ils se distinguent des antiseptiques par l'origine et le procédé d'obtention. Les antiseptiques sont obtenus par procédé chimique à partir de substance non organiques (ex SO₂) ou de substance organique (ex acide sorbique et acide benzoïque), tandis que les antibiotiques qui sont synthétisés par la cellule vivante sont obtenues par voie biochimique.

Les antibiotiques les plus répons sont d'origine microbienne (ex la pénicilline), il existe des antibiotiques d'origine végétale (ex substance bactéricide de l'oignon, l'ail, la moutarde).

Les antibiotiques sont plusieurs centaines de fois plus bactéricides que les antiseptiques.

Pratiquement l'unique antibiotique autorisé dans certains pays comme conservateur des denrées alimentaires et encore sous des conditions particulières est la biomycine.

La biomycine peut s'éliminer complètement après traitement thermique court, c'est pourquoi il est recommandé pour la conservation des produits d'origine animale ;

On recommande d'utiliser dans l'industrie alimentaire certains antibiotiques comme la nisine synthétisé par *Streptococcus lactus*.

L'antibiotique d'origine végétal le plus commode pour la conservation est l'huile essentielle des graines de moutarde, son introduction dans les marinades en quantité de 0,002% permet une conservation d'une année sans pasteurisation mais le produit est emboîté et hermétisé.

Le tableau suivant résume les autres agents conservateurs qui peuvent être utilisés dans l'industrie agro-alimentaire :

Tableau 5 : Autres agents conservateurs

Molécules	Propriétés	Type de produit
Phosphates (acide orthophosphorique, sels sodiques, potassique et calcique)	antimicrobiennes	Boissons sans alcool Laits stérilisé et UHT Crème, fromages fondus Produits de viande Soupes, potages et bouillons Œufs liquides Cidre Poudres Surimi Produits de pomme de terre
Nitrates et nitrites (NaNO ₃ ; KNO ₃ ; NaNO ₂ ;KNO ₂)	Anti clostridium Effet synergique avec baisse du pH et de l'aw	Produits d salaisons de viande crus ou cuits Conserves de viande

	Couleur rose des produits carnés	Foie gras
Anhydride sulfureux et sulfites (anhydride sulfureux, sulfite de sodium, sulfite acide de sodium, disulfite de sodium ou de potassium, sulfite de calcium, sulfite acide de calcium, sulfite acide de potassium)	Pouvoir antimicrobien (bactéries, moisissures) Inhibition des phénomènes de brunissement enzymatique ou d'instabilité de couleur blanchiment de la chair de morue	Boissons alcoolisées ou non, à base de fruits, de céréales, de miel Vinaigre et moutarde Sirops de glucose et autres Produits sucrés
Anhydride carbonique et carbonates (CO ₂)	Fongistatique et bactériostatique (plus efficace contre Gram-) Augmentation de la durée de vie des produits	Boissons gazeuses Viandes, pâtisseries et viennoiseries, plats cuisinés (atmosphères modifiés)
Acide sorbique, sorbates (potassium et calcium)	Fongistatiques Pouvoir antibactérien moins affirmé Effet synergique inhibiteur positif avec autres additifs conservateur Actif jusqu'à Ph 6,5 (intérêt par rapport aux acides faibles)	Boissons sans alcool Confitures Fruits et légumes Poissons en semi-conserves et séchés Œufs de poisson, crevettes Fromages fondus Œufs liquides et déshydratés Confiseries, sauces, moutardes et assaisonnements Soupes non stérilisées
Acide benzoïque et benzoates (sodium, potassium et calcium)	Effet contre les bactéries, les levures et dans une moindre mesure contre les moisissures Actif jusqu'à Ph 4,5	Boissons avec ou sans alcool Légumes en saumure Fruits confits Poissons et œufs de poisson en semi-conserve Pâtes à mâcher Sauces, salades préparées, moutarde
Esters de l'acide parahydrobenzoïque (parabens)	Actifs sur les moisissures, les levures, effets moindres sur les bactéries Synergie entre les parabens et les huiles essentielles Actifs jusqu'à Ph 8	Enrobage de gelées pour produits carnés, traitement de surface pour viande séchée, amuse-gueule de céréales ou pomme de terre, confiseries
Acide propionique et propionates (sodium, calcium, et potassium)	Actif sur les moisissures pH < 5	Boulangerie (pain tranchés et préemballés) Pâtisseries industrielles
Dicarbonat de diméthyle (DCDM)	Produit très efficace Inhibiteur de levures Efficace aussi contre moisissures et bactéries	Vins Thés prêts à boire Boissons sportives Jus de fruits
Biphényle, orthophénylphénol,	Antifongiques	Traitement de surface des agrumes et des bananes

thiabendazole		
Nisine	Bactériocine produite essentiellement par <i>Lactococcus lactis</i> Efficace contre <i>Clostridium butyricum</i> , Faible activité sur <i>E.coli</i> et <i>L. monocytogenes</i> (sauf si effet synergique avec un traitement thermique sublétal)	Protection des fabrications fromagères contre <i>Clostridium butyricum</i> Gâteau de semoule et de tapioca Fromages affinés et fondus Crème caillées
Natamycine	Antibiotique Efficace sur de nombreuses moisissures	Traitement de surface des fromages à pâte dure, semi-dure et molle Saucisses sèches et saucisson
Ethylène diamine tétracétate (EDTA) de calcium disodium	Antibactérien par sa fonction acide faible Propriétés chélatantes des ions divalents Diminue à Ph 7 la thermorésistance de <i>C. sporogenes</i>	Sauces émulsionnées Crustacés et mollusques en conserve Poissons en conserve Crustacés congelés et surgelés Légumes, champignons et artichauts en conserves

6.2.les anti-oxydants :

Ils limitent l'oxydation des lipides contenus dans les aliments et limitent la formation de radicaux libres afin de préserver à la fois les qualités organoleptiques, nutritionnelles et hygiéniques:butylhydroxyanisol (BHA), butylhydroxytoluène (BHT), gallate de propyle, vitamine E, acide ascorbique...

7.Les solutions concentrées

Les concentrations élevées de substances osmotiquement actives favorisent la plasmolyse des cellules de l'aliment et surtout des microorganismes. On emploie pour la conservation des aliments :

7.1.Le salage

Le sel de cuisine en solution de 10 à 12%. En pratique on n'utilise pas l'action unique du sel mais on le combine avec un conditionnement hermétique.

Le chlorure de sodium peut être additionné de substances telles que le nitrite de sodium à raison de 0.5% utilisé surtout pour la salaison des viandes, le carbonate de magnésium à raison de 1 à 2%.

Les salaisons traditionnelles donnaient des produits très secs de faible aw, qui étaient conservés souvent à température ambiante dans des locaux secs. Exemple : les saucissons, les morues.

La plupart du temps, on associe salaison et conditionnement spécifique suivi d'une pasteurisation pour obtenir des semi conserves de courte durée de conservation.

Certaines préparations : anchoix, olives, utilisent un liquide de saumure dans lequel sont plongés les aliments. Les micro-organismes sensibles au sel sont alors éliminés du fait de l'élévation de la pression osmotique, les souches microbiennes ne peuvent se développer.

Les aliments conservés par salaison traditionnelle peuvent être soumis à des altérations dues aux moisissures qui se développent en surface, souvent associées à une oxydation des lipides quand des produits en sont riches (exemple : la viande, les charcuteries, les poissons).

7.2.Le sucrage :

Ce procédé concerne surtout les fruits pour la fabrication des confitures. Le sucre en concentration de 60 à 70% est utilisé ce qui provoque une diminution importante de l'activité de l'eau et une plasmolyse stable des cellules microbienne à condition d'utiliser un conditionnement hermétique.

Il est possible d'observer un développement de moisissures ou de levures à la surface du produit quand les pots sont ouverts.

L'utilisation du sucre pour la conservation des aliment provoque une modification importante de la valeur nutritionnelle initiale du produit fini.

8.Le fumage

La fumée contient des substances bactéricides, cette méthode était toujours associée à un séchage plus ou moins complet de l'aliment et parfois même un salage

9. Les atmosphères modifiées

Un mélange normal est définit par la composition suivante : $CO_2+O_2=21\%$, $N_2= 79\%$.

Un mélange subnormal est définit par la composition suivante :

$CO_2 (3 \text{ à } 5\%) + O_2 (3 \text{ à } 5\%) < 21\%$, $N_2= 90 \text{ à } 94\%$.

Le principe de cette méthode est basée sur le ralentissement de la respiration en diminuant le volume de l'oxygène jusqu'à 5% ce qui implique augmentation de la concentration du CO_2 par respiration jusqu'à 16% (mélange normal). Le CO_2 en excès est fixé jusqu'à 5% par un absorbant chimique (ex NaOH) (mélange subnormal).

Le ralentissement de la respiration est dû au même temps à la présence de CO_2 et à la faible teneur en O_2 . Souvent on combine les atmosphères modifiées avec les basses températures.

10. Les rayonnements

Les rayons UV ont une action bactéricide dans le domaine 2950 à 2000 Å°. L'action bactéricide maximale est observée à 2600 Å° (angstrum).

Du fait de leurs faibles pouvoirs pénétrant l'utilisation des rayonnements UV est limitée. Ils peuvent être utilisés pour la désinfection de l'air, des surfaces des murs, la stérilisation de l'emballage et le lait en couche mince.

Les rayonnements UV ne traversent pas les parois des récipients en fer blanc et en verre.

10.1. Les rayonnements ionisants :

L'ionisation des aliments est un procédé qui a pour but de les assainir et /ou d'augmenter leur durée de vie par destruction des activités microbiennes. Bien qu'il se soit développé il y a une trentaine d'années, son domaine d'application reste limité et il est appliqué dans le cas des produits crus ou thermosensibles. Ce procédé peut être utilisé même sur des produits congelés et des produits pré-emballés.

Ce sont des rayonnements de grande énergie et ils sont capables de provoquer l'ionisation des atomes et stimuler dans les produits traités des réactions chimiques.

A une dose déterminée de rayonnement ionisant il est possible de tuer les microorganismes (radappertisation). Les doses limites ne doivent pas dépasser 10^3 rad.

Les formes sporulées anaérobies sont très résistantes à l'irradiation. Pour les agents du botulisme des doses de (4-5) 10^6 rad sont exigées, ces valeurs peuvent provoquer :

- apparition d'odeurs étrangères et des arrière goûts indésirables,
- la décomposition des substances alimentaires (ex acide ascorbique),
- formation de composés toxiques,

11. La pascalisation

Le procédé à haute pression hydrostatique (HPH), également appelé « pascalisation », est une technologie qui augmente la durée de conservation des aliments. En soumettant les aliments déjà emballés à des pressions hydrostatiques extrêmes (jusqu'à 600 MPa) au moyen de l'eau comme transmetteur de pression, la très grande majorité des microorganismes pathogènes et des agents responsables de la détérioration des aliments sont détruits. Ce procédé permet en moyenne de tripler la durée de conservation des produits alimentaires (jus, viandes tranchées par exemple) comparativement aux procédés conventionnels.

De plus, ce procédé permet de conserver toute la fraîcheur et la majorité des qualités organoleptiques et nutritionnelles de l'aliment traité. Cependant, comme ce procédé n'a que peu d'effet sur les spores bactériennes, il est nécessaire de réfrigérer le produit traité.

Application dans l'industrie agro-alimentaire

Ce traitement est applicable à des produits alimentaires liquides et solides sous emballage souple, imperméable (sacs flexibles sous vide et bouteilles de plastique), apte à transmettre la pression subie à son contenu.

Dans un premier temps, les aliments emballés sont introduits dans un panier. Puis, le panier est acheminé dans l'enceinte du système de mise sous pression. L'eau remplit ensuite cette enceinte, scellée aux deux extrémités. Cette eau est très fortement comprimée à l'aide d'une pompe. Comme la pression s'exerce de façon uniforme et instantanée, les aliments traités sont donc peu déformés. Dès que la pression cible est atteinte (entre 1 et 3 min selon le niveau de pression souhaitée), elle est maintenue pendant 2 à 5 min selon les caractéristiques physicochimiques du produit traité et son niveau de contamination initiale. Lorsque le temps de mise sous pression est atteint, la décompression est instantanée et le produit reprend sa forme initiale. L'eau de l'enceinte est récupérée pour le prochain cycle de traitement.

Le panier sort de l'enceinte et les produits alimentaires traités dont la surface de l'emballage est mouillée, sont séchés rapidement par de puissants jets d'air. Les aliments sont ensuite codés avec la date de péremption. Finalement, les produits alimentaires sont entreposés en chambre froide avant d'être distribués dans les chaînes d'alimentation.

La haute pression hydrostatique et la conservation des aliments : mécanisme d'action

La pression hydrostatique utilisée pour augmenter la durée de conservation des aliments (600 MPa) est extrême. Elle représente près de six fois celle que l'on retrouve au fond de la fosse des Mariannes, l'endroit le plus profond du monde. L'augmentation de la durée de conservation des aliments par le traitement à HPH est due à :

1. La modification importante des structures secondaires, tertiaires et quaternaires des protéines et des enzymes microbiennes. Ces modifications induisent une perte des activités biologiques entraînant la mort des microorganismes;

2. La formation de pores membranaires à la surface des microorganismes par lesquels le contenu cellulaire bactérien va s'échapper, entraînant ainsi la mort bactérienne.

D'autres effets de la HPH sur les aliments ont été exploités par l'industrie agroalimentaire. Ainsi, plusieurs recherches ont démontré que ce traitement permet de diminuer l'allergénicité de certaines matrices alimentaires (p. ex. noix, arachides, soya). Mais, il reste encore beaucoup de travail pour optimiser les paramètres de mise sous pression afin de rendre ces protéines alimentaires sécuritaires pour les personnes allergiques.

Un avantage du traitement par HPH est qu'il n'affecte globalement pas les molécules liées à la saveur d'un aliment. De manière similaire, les pigments et les vitamines sont davantage préservés comparativement aux procédés de conservation conventionnels utilisant la chaleur. Par conséquent, les aliments traités par HPH conservent des caractéristiques très similaires à celles des produits frais.

Les avantages du procédé

- > Augmentation de la durée de conservation des aliments traités;
- > Perte minimale de vitamines et de composés bioactifs d'intérêt après le traitement par HPH et au cours de la période d'entreposage comparativement aux procédés thermiques de conservation conventionnels;

- > Modification minime de la couleur et du goût des alimentstraités;
- > Respect de la démarche de naturalité souhaitée par le consommateur (Clean Label);
- > Aucune contamination croisée puisque les produits traités par HPH sont déjà emballés;
- > Caractère durable du procédé(qui ne requiert que de l'eau etde l'électricité).

Limites de l'utilisation du procédé à HPH dans l'industrialimentaire

- > Le coût d'acquisition des installations est élevé (se chiffre en millions de dollars);
- > Le procédé est réalisé par lot ce qui augmente le temps de traitement. Quelques compagnies proposent des procédés permettant une utilisation en semi-continu;
- > Le niveau d'énergie appliqué sous forme de pression étant important, ce procédé est fragileet le coût d'entretien est élevé;
- > Les aliments traités sont à haute valeur ajoutée (p. ex. on va préférentiellement choisir de traiter des jus de fruits BIO au traitement HPH comparativement à des jus conventionnels qui sont traités à la chaleur);
- > Ce procédé ne permet pas de stériliser les produits ; les alimentsdoivent donc être conservés au réfrigérateur.

Références bibliographiques

Cheftel, J.C., Cheftel, H. (1977). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Techniques et documentation-lavoisier, vol (1), I.S.B.N 2-85206-071-X

Lavigne, C. La conservation des aliments par le procédé à haute pression hydrostatique. Nutrition scins n évolution. Vol(16), 3, 2019

Cheftel, J.C., Cheftel, H. (1977). Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. Techniques et documentation-lavoisier, vol (1), I.S.B.N 2-85206-071-X, pp 380

Jeanet, R., Croguennec, T., Schuck, P., Brulé, G. (2006). Science des aliments. Techniques et documentation-lavoisier, vol (1), Techniques et documentation-lavoisier, vol (1), I.S.B.N 2-7430-0833-4, pp383

Bimbenet, J.J., Duquenoy, A., Trystram, G (2002). Génie Des Procédés Alimentaires Des bases aux applications, Paris, 1^{re} édition, pp 554.

M.Le Meste, B.Colas, L'eau dans les procédés de transformation et de conservation des aliments, Paris, Janvier 1990, pp277.

J.L.Multon, Conservation et Stockage des Grains et Graines et Produits dérivés céréales, oléagineux, protéagineux, aliments pour animaux, Volume 2, Paris, 1982, pp 1154.

G.Albagnac, P.Varoquaux, J.C.Montigaud, Technologies de transformation des fruits, Paris 2002, pp 498.

J.J.Bimbenet, A.Duquenoy, G.Trystram, Génie Des Procédés Alimentaires Des bases aux applications, Paris, 1^{re} édition, Mars 2002, pp 554.

J.L.Multon, Conservation et Stockage des Grains et Graines et Produits dérivés céréales, oléagineux, protéagineux, aliments pour animaux, Volume 2, Paris, 1982, pp 1154.

G.Albagnac, P.Varoquaux, J.C.Montigaud, Technologies de transformation des fruits, Paris 2002, pp 498.

E.Espiard, Introduction à la transformation industrielle des fruits, Paris 2002, pp360.

M.Roberfroid, Aliments fonctionnels, Paris 2002, pp 342.

J.C.Cheftel, H.Cheftel, Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments, Volume 1, Paris 1977, 7^{ème} tirage 1992, pp381.

J.C.Cheftel, H.Cheftel, Introduction a la biochimie et à la technologie des aliments Volume 2, Paris 1^{re} édition-1^{er} trimestre 1977, 4^{ème} tirage 1983, pp 419.

M.Le Meste, B.Colas, L'eau dans les procédés de transformation et de conservation des aliments, Paris, Janvier 1990, pp277.

P.Munier, A.Vilardebo, E.Laville, R.Naville, Collection : techniques agricoles et productions tropicales. Le palmier Dattier,

G-P. Maisonneuve et Larose, Paris (V^e), 1973 .

P. Salagro, Pratique et Manipulations chimiques ; Edition technique et document, pp 77-153.

Association Française de Normalisation (AFNOR) ; 198.C.Rabâa, R.Ali Brac, Le palmier Dattier ; Edition Edicud.

Belgue M..(2002). Ressources Génétiques des Palmiers Dattier, Edition EnNakhla,pp 35-62.

Roussef R., NAGYL..(1994). Health and Nutritionnal Benefits of citrus fruits compenents Edition Food Technologie, pp123-134.

Whitney E., OLFES S.. (1999) Derstanding Nutrition. Edition Flammarion Printed France, pp295-468.

mémoire de fin d'étude, thème: analyse du processus de diffusion dans le système Datte-jus d'agrumes, université Abderahmane MIRA de Bejaia, promotion 2002-2003.

Regal L.. (1993). Répertoire Général des Aliments. Edition et Documentation-Lavoisier, pp45-60.

Ait Ameer, L. (2001). Analyse du processus de diffusion des sucres, des acides organiques et de l'acide ascorbique dans le système : Mech-Degla/jus de citron. Mémoire de magister. *Département de technologie alimentaire*. Boumerdes, 80.

Abers, J. E., & Wrolstad, R. E. (1979). Causative factors of colour deterioration in strawberry preserves during processing and storage. *Journal of Food Science*, 44, 75-78, 81.

Acouren, S., & Tama, M. (1997). Caractérisation physico-chimique des principaux cultivars de dattes de la région des Zibans. *Recherche Agronomique*, 1, 59-66.

Al-Shahib, W., & Marshal, R.J. (2003). The fruit of the date palm: Its possible use as the best food for the future?. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 54, 247-259.

Amellal, H., & Benamara, S. (2008). Vaccum drying of common date pulp cubes. *Drying Technology*, 26, 378-382.

Arslan, D., & Musa Ozcan, M. (2007). Evaluation of drying methods with respect to drying kinetics, mineral content and colour characteristics of rosemary leaves. *Energy Conversion and Management*, 2-6.

Baléo, J. N., Bourges, B., Courcoux, Ph., Faur-Brasquet, C., & Le cloirec, P. (2003). Méthodologie Expérimentale, Méthodes et outils pour les expérimentations scientifiques. *Techniques et Documentation, Lavoisier*, 361.

Barreiro, J. A., Milano, M., & Sandoval, A. J. (1997). Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 33, 359-371.

Benamara, S., Chibane, H., & Boukhelifa, M. (2004). Essai de formulation d'un yaourt naturel aux dattes. *Revue des Industries Agricoles et Alimentaires*, 1, 11-14.

Bonazzi, C., & Bimbenet, J.J. (2000). Séchage des produits alimentaires-Principes. In: *Techniques de l'Ingénieur, Paris, France, F3000*.

^aBonazzi, C., & Bimbenet, J.J. (2008). Séchage des produits alimentaires-Matériels et applications. In : *Techniques de l'Ingénieur, Paris, France, F3002*.

^bBonazzi, C., Dumoulin, E., & Bimbenet, J. J. (2008). Le séchage des produits alimentaires. *Industrie Alimentaire Agricole, 125 (03-04)*, 12-22.

Booij, I., Piombo, G., Risterucci, J.M., Coupe, M., Thomas, D., & Ferry, M. (1992). Etude de la composition chimique de dattes à différents stades de maturité pour la caractérisation variétale de divers cultivars de palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*). *Fruits, 06*, 667-678.

Bouraout, M., Richard, P., & Durance, T.(1994). Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering, 17*, 353-363.

Bourbonnais, R., & Teraza, M. (1998). Analyse des séries temporelles en économie. *Presses Universitaires de France*, 280.

Brac de la Perriere. (1988). Les recherches sur les ressources génétiques du palmier dattier. *Dans, Ann. Inst. Nat. Agro, d'El-Harrach, vol 12(1), T(2)*, P(493-506).

Chekroune, M., Derradji, N., Amellal, H., Abdellaoui, R., Akbibouche, N., Allane, T., Hammoudi, N., Ait-Ameur, L., & Benamara, S.(2008). Effet du couple temps-température sur l'efficacité du séchage. Cas des dattes MECH-DELA. *Industrie Alimentaires et Agricoles, 125, 3-4*, 22-25.

Djouab A. (2007). Valorisation des constituants mineurs de la datte Mech-Degla dans une recette de margarine allégée. Mémoire de magister. Département de Technologie Alimentaire. Boumerdès, 103p

Cook, J.A., & Furr, J.R.(1952). Sugars in the fruits of soft, semi-dry and dry commercial date varieties. *Date Grower's Institute Report, 29*, 3-4.

Espiard, E.(2002). Poudres de fruits. Introduction à la transformation industrielle des fruits. *Lavoisier, Paris*, 56-59.

Feng, H., & Tang, J.(1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science, 63*, 679-683.

Garcia-Viguera, C., Zafrilla, P., Romero, F., Abellan, P., Artes, F., & Tomas-Barberan, F.A.(1999). Colour stability of strawberry jam as affected by cultivar and storage temperature. *Journal of Food Science, 64*, 243-247.

Giese, J.(1992). Advances in microwave food processing. *Food Technology, 46*, 118-123.

Goupy, J.(2001). Introduction aux plans d'expériences. *Dunod, Paris, 2^{ème} édition*, 293.

Gowen, A.A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J.(2008). Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot-air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 9*, 129-137.

Hussein, F., Moustafa, S., El-Kahtani, M., El-Samiraie, F.,& El-Zeid, A.(1974). Studies on physical and chemical characteristics of eighteen date cultivars grown in Saudi Arabia. Kingdom of Saudi Arabia, *Ministry of agriculture, Research Bulletin,4*, 5-18.

Lee, H.S., & Coates, G.A.(1999). Thermal pasteurisation effects on colour of red grapefruit juices. *Journal of Food Science, 64*, 663-666.

Le Meste, M., Roudaut, G., Chiotelli, E., Simatos, D., & Colas, B. (2001). Functional properties of water in food. *Ind. Alim. Agr.*, 11(8), 21-28.

Lozano, J.E., & Ibarz, A.(1997). Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 31, 365-373.

Maskan, M.(2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44, 71-78.

^aMaskan, M.(2001). Drying, Shrinkage and rehydratation characteristics of Kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48, 177-182.

^bMaskan, M.(2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 169-175.

Mélar, G.(1991). Statistique et mathématiques appliquées : Méthodes de prévision à court terme. *Ellipses, Paris*, 171-389.

Mudgett, R.E.(1989). Microwave food processing. *Food Technology*, 43, 117-126.

Munier, P.(1973). Techniques agricoles et productions tropicales. Le palmier dattier. Paris : G-P. *Maisonneuve et Larose*,141-150.

Peyron, G.(2000). Guide illustré de formation cultiver le palmier dattier,110.

Reynes, M., Bouabidi, H., Piombo , G., & Ristrucci, A.M.(1994). Caractérisation des principales variétés de dattes cultivées dans la région du Djérid en Tunisie. *Fruits*, 49(4), 289-298.

Schimmerling, P., Sisson, J.C., & Zaidi, A.(1998). Pratique des plans d'expériences. *Technique et Documentation, Lavoisier*, 61-438.

Skrede, G.(1985). Colour quality of blackcurrant syrups during storage evaluated by Hunter. *Journal of Food Science*, 50, 514-517, 525.

SPC Software (document). (2001). Formation à la théorie de la couleur. Parc des Peuplier, Nanterre cedex, 3-22.

Yongsawatdigul, J. & Gunasekaran, S.(1996). Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20, 145-156.

