

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE d'ORAN -Mohamed Boudiaf



Faculté de Chimie

Département de Génie Chimique

POLYCOPIÉ

COURS DE PROCÉDÉS AGRO-ALIMENTAIRES

**Procédés de transformations et de conservations agro-alimentaires,
Généralités sur les procédés de séparation, Opérations physico-chimiques et de
structuration, Opérations mécaniques et manufacturières**

Elaboré par

M^{me}. HADJ YUCEF née REFFAS Hasnia

Maitre de Conférences A, à L'USTOMB

Année universitaire : 2022/2023

AVANT-PROPOS

Les *procédés agro-alimentaires*, dits aussi « *génie des procédés alimentaires* », présentent, par rapport au génie des procédés " *classique* ", un certain nombre de spécificités liées à la nature des produits alimentaires transformés (variabilité des matières premières, grande diversité des produits, finalité alimentaire, *etc...*).

Cours de *procédés agro-alimentaires* s'adresse aux étudiants en **Licence-L3** « Génie des procédés ». Ils sont conformes aux programmes de la spécialité « Génie des procédés » de la filière Génie des procédés. En outre, ces cours constituent une source essentielle de connaissance théorique de base pour assimiler ce module qui s'inscrit dans **l'Unité d'enseignement Découverte du Semestre 1**.

Dans ce polycopié, je traite des technologies ou opérations unitaires traditionnelles en industrie agroalimentaire (pasteurisation, stérilisation, *etc...*) mais aussi de technologies de séparation classiques (distillation, extraction par solvant, *etc...*) ou d'autres qui sont appelées à se développer (séparation membranaires).

Les cours qui sont donnés dans ce polycopié ont pour objectif de :

- Faire découvrir une importante spécialité du Génie des procédés en présentant les notions de génie des procédés spécifiques à cette branche de l'activité économique;
- Enumérer les procédés et opérations unitaires, succinctement, appliqués à l'agro-alimentaire ;
- Identifier les différents équipements intervenant dans la fabrication d'un aliment.

Le polycopié est réparti en *cinq chapitres* comme suit :

- Le **CHAPITRE I** présente une introduction générale aux industries agro-alimentaires (Historique, Définitions d'un aliment, *etc...*) ;
- Le **CHAPITRE II** porte sur les procédés de transformation et de conservation employés en industrie agro-alimentaires (Pasteurisation, Réfrigération, *etc...*) ;
- Le **CHAPITRE III** examine les différentes techniques de séparation usuels (Distillation, extraction par solvant, *etc...*) ;
- Le **CHAPITRE VI** se concentre sur les opérations physico-chimiques et de structuration de divers aliments (Coagulation, Gélification, *etc...*) ;

- Le **CHAPITRE V** traite des différentes opérations unitaires mécaniques et manufacturières indispensables appliquées aux aliments.

Il est à signaler que les cours qui seront évoqués dans les *quatre chapitres* sont en relation avec les notions et les concepts sur les techniques de séparation et les phénomènes de transfert, donnés dans les modules « *Transfert de chaleur* » et « *Opération unitaires* ».

Enfin, de nombreuses questions de cours, qui ont été proposées dans les sujets d'examen final du module « *Procédés Agro-alimentaires* » constituées au fil des ans, seront présentées à la fin de ce polycopié. Ces sujets avaient souvent été élaborés en collaboration, avec le **Professeur M. Hadj Youcef** qui a enseigné ces cours avec moi. Je le remercie pour un consentement que je me suis permis de supposer acquis.

Ainsi, j'espère que ce document permettra d'apporter aux étudiants en *Licence GP* un outil d'apprentissage utile, répondant à leurs attentes, et visant la compréhension des concepts et principes de l'ingénierie des *Procédés Agro-alimentaires*.

SOMMAIRE

CHAPITRE I : INTRODUCTION AUX PROCEDES AGRO-ALIMENTAIRES

I.1 Définition de l'industrie agro-alimentaire	2
I.2 Historique.....	2
I.3 Définitions et classement des aliments.....	3
I.4 Altération des aliments	4

CHAPITRE II : PROCEDES DE TRANSFORMATION ET DE CONSERVATION AGRO-ALIMENTAIRES

II.1 Introduction	6
II.2 Principaux facteurs de développement des microorganismes dans l'aliment.....	6
a) Le pH.....	7
b) L'activité de l'eau (A_w).....	7
c) Température.....	9
d) Composition de l'aliment.....	10
II.3 Procédés de conservation des aliments	11
II.3.1 Procédés thermiques.....	11
II.3.1.1 Procédés par ajout de chaleur.....	11
A. Pasteurisation.....	11
B. Stérilisation.....	14
C. Appertisation.....	17
D. Ultra Haute Température (UHT).....	18
E. Blanchiment.....	19
II.3.1.2 Procédés thermiques par soustraction de chaleur.....	20
A. Réfrigération.....	20
B. Congélation.....	21
C. Surgélation.....	22

SOMMAIRE

II.4 Procédés par modification de l'activité de l'eau (A_w)	24
II.4.1 Modification de A_w avec les procédés thermiques	24
A. Séchage	24
B. Lyophilisation	25
C. Fumage	26
D. Concentration	26
II.4.2 Modification de A_w par adjonction de produits chimiques	26
A. Salage	27
B. Confissage	28
II.5 Autres procédés de conservation	29
A. Fermentation	29
B. Modification de l'atmosphère	30
C. Irradiation/Ionisation	31
D. Conservation par addition de produits chimiques	33

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LES PROCEDES DE SEPARATION

III.1 Séparation de phase	36
A. Pressage	36
B. Décantation et centrifugation	38
C. Filtration	41
III.2 Séparation a l'échelle moléculaire	46
A. Extraction par solvant	46
B. Distillation	48
C. Evaporation	51
D. Procédés membranaires	53

CHAPITRE IV : OPERATIONS PHYSICO-CHIMIQUE ET DE STRUCTURATION

IV.1 Opérations physico-chimiques	58
A. Coagulation	58
B. Gélification	60

SOMMAIRE

IV.2 Opérations de structuration	62
A. Emulsification	62
B. Cuisson-Extrusion	64
C. Foisonnement	66

CHAPITRE V : OPERATIONS MECANIKES ET MANUFACTURIERES

V.1 Opérations mécaniques	71
A. Broyage	71
B. Tamisage	77
C. Découpage	79
V.2 Opérations manufacturières	83
A. Emballage et conditionnement	83

CHAPITRE I

INTRODUCTION AUX PROCÉDÉS

AGRO-ALIMENTAIRES

CHAPITRE I :

INTRODUCTION AUX PROCÉDES AGRO-ALIMENTAIRES

I.1 DEFINITION DE L'INDUSTRIE AGRO-ALIMENTAIRE

L'industrie alimentaire, encore appelée « **industrie agroalimentaire** » (en abrégé **IAA**) est l'ensemble des activités industrielles qui transforment des matières premières issues de l'agriculture, de l'élevage ou de la pêche en produits alimentaires destinés essentiellement à la consommation humaine.

I.2 HISTORIQUE

Depuis le début de l'Humanité, soit il y a environ **3.000.000 d'années**, l'homme s'est toujours posé la même question: comment me nourrir ?

Le temps humain, soit environ 3.000.000 d'années, peut être divisé en trois âges alimentaires, chacun étant caractérisé par la prédominance d'un système alimentaire: respectivement l'âge pré-agricole, l'âge agricole et l'âge agro-industriel.

- L'ÂGE PRÉ-AGRICOLE.

L'âge pré-agricole est celui du triomphe (succès) du système de la cueillette, de la chasse et de la pêche. L'homme prélève ses aliments sur son environnement végétal et animal, soit sur les éco-systèmes naturels. C'est la période de l'aliment sauvage.

- L'ÂGE AGRICOLE

L'événement majeur de l'âge agricole est le passage de l'aliment cru à l'aliment cuit. L'homme passe du stade de prédateur à celui de producteur (passer de la cueillette à l'agriculture) .

- L'ÂGE AGRO-INDUSTRIEL

La révolution industrielle du *XVIII^e* siècle bouleversa le système alimentaire de la période agricole et lui substitua un autre système que nous appelons **agro-industriel**.

- LES DATES CLES DE L'INDUSTRIALISATION DE L'ALIMENTATION

- **1790 : les prémices de la stérilisation.** Fin du XVIII^e siècle, une nouvelle méthode de conservation (autre que le salage, le fumage et le séchage) est inventée par un britannique, à base de chauffage des aliments dans des boîtes hermétiquement closes. Cette méthode appelée **stérilisation** sera bientôt répandue en Europe et dans le monde entier.
- **1913 : l'électroménager.** Début de l'électroménager dans les cuisines. Le premier réfrigérateur est construit, et sera commercialisé pour les particuliers en 1926. Le **congélateur** arrivera bien plus tard, dans les années 1960, quasiment en même temps que le **four à micro-ondes** (1959).
- **1929 : industries agroalimentaires.** Les grosses entreprises agroalimentaires commencent à voir le jour, notamment Danone.
- **1930 : début des pesticides chimiques.** Grâce au développement des armes chimiques de guerre, des molécules chimiques utiles à l'agriculture ont pu être découvertes. C'est le début des pesticides de synthèse (dont le DDT en 1943), des herbicides (le 2,4-D en 1944) et des fongicides (1955).
- **1961 : additifs alimentaires.** Les additifs alimentaires sont maintenant recensés et contrôlés par un code alimentaire (*Exxx*), la Commission du *Codex Alimentarius*.

I.3 DEFINITIONS ET CLASSEMENT DES ALIMENTS

a) L'aliment :

Est un élément d'origine animale ou végétale (parfois minérale), consommé par des êtres vivants à des fins énergétiques ou nutritionnelles. On parle alors d'alimentation.

b) Classement :

On distingue plusieurs grandes familles d'aliments :

- Boissons
- Corps gras : riches en lipides, *vitamine A* et *vitamine D* (beurre et crème), en *vitamine E*, et acides gras essentiels.
- Féculents : (pain, pâtes, riz, pommes de terre, légumes secs, autres céréales) riches surtout en glucides mais également en *protéines*, *vitamine B*, minéraux et fibres.
- Lait et produits laitiers : riches en *protéines*, calcium et *vitamine B*.

- Légumes et fruits (riches en vitamines *anti-oxydantes* et *vitamine C* (surtout crus)) et en sucre et produits sucrés)
- Viande, poisson, œufs (riches en protéines et en fer)

I.4 ALTERATION DES ALIMENTS

Les aliments peuvent devenir nuisibles sous l'action de plusieurs agents biologiques, mécaniques ou physiques :

1- AGENTS BIOLOGIQUES :

- **Les enzymes** présents naturellement dans les aliments,
- **Les micro-organismes** (bactéries, virus, moisissures, levures) : Ils peuvent affecter la qualité des aliments pendant toutes les phases de la manipulation, depuis le producteur jusqu'au consommateur final. Ces modifications peuvent être néfastes et dangereuses pour la santé du consommateur et affectent la valeur nutritive de l'aliment :

a- Altération de l'aspect ou de la texture :

- **Pigmentation anormale** (rose pour *Serratia*, noire ou verdâtre pour les *moisissures*).
- **Film visqueux ou irisé** (qui a les couleurs de l'arc-en-ciel) (dû aux bactéries aérobies strictes dans les aliments conservés à l'état libre).
- **Dégagements gazeux anormaux.**
- **Viscosité anormale** (gélification par des bactéries capsulées ou par production de *dextrane* à partir de *saccharose* par la *Leuconostoc*)

Ces altérations peuvent ne pas provoquer de toxicité mais rendent le produit peu appétissant ou invendable.

b- Altérations du goût et de l'odeur :

- **Odeur de moisi** (moisissures, *Actinomycétales*),
- **Goût de rance** : qui a une forte odeur et une saveur acre (piquant et irritant au goût et à l'odorat) (dû au *2,3 butanedione* produit par la *Leuconostoc*),
- **Présence de H_2S ou d'indole** (*Entérobactéries*).

c- Altérations des qualités nutritives :

- Par l'apparition de substances toxiques,
- Par dégradation de molécules nutritives (acides aminés essentiels) d'où une diminution de la valeur nutritive de l'aliment.

2- AGENTS MECANIQUES OU PHYSIQUES :

- **Mécanique** : coups sur les fruits et légumes.
- **Physique** : l'oxygène entraîne une oxydation, une destruction de la *vitamine C*, un rancissement des corps gras (altération des corps gras entraînant une modification désagréable de leur odeur et de leur saveur).

CHAPITRE II

PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION ET DE CONSERVATION AGRO-ALIMENTAIRES

CHAPITRE II :

PROCEDES DE TRANSFORMATION ET DE CONSERVATION

AGRO-ALIMENTAIRES

II.1 INTRODUCTION

La plupart des aliments nécessitent, pour être conservés efficacement, une étape de contrôle de leurs biochimies, cela concerne autant les viandes que les poissons, les fruits et légumes que les laitages : il s'agit d'empêcher le développement des bactéries, champignons et autres micro-organismes, et de retarder leurs rancissement et autolyse

Pour vivre et proliférer, les micro-organismes ont besoin :

- de nourriture c.à.d des *substances nutritives* (substances organiques comme source d'énergie (*C, H, N, O* en quantité importante), *P, S* en quantité plus faible, les sels minéraux en très faible quantité (*Ca, Na, K, Mg... etc*),
- d'eau sous forme libre : activité de l'eau qui ne représente pas la teneur en eau (ou humidité) mais bien la *disponibilité* de cette eau,
- de chaleur,
- et d'oxygène (sauf pour les bactéries anaérobies).

Tous les **procédés de conservation** ont pour but de les priver de l'accès à un de ces éléments. Une fois la privation réalisée, le maintien dans cet état empêche le processus de dégradation de reprendre, cela s'applique par des règles d'hygiène alimentaire et par un emballage protecteur.

L'altération des aliments est perceptible à des taux supérieures à 10^7 *bactéries /g* et 10^5 *levures/g*.

II.2 PRINCIPAUX FACTEURS DE DEVELOPPEMENT DES MICROORGANISMES DANS L'ALIMENT

Les facteurs les plus importants qui influencent la croissance des micro-organismes dans les aliments sont : le *pH*, la *température*, *l'activité de l'eau* (A_w) et *la composition de l'aliment*

a) Le pH :

En industrie agro-alimentaire, on classe habituellement les micro-organismes entre ceux qui peuvent se développer au-dessous ou au-dessus d'un **pH de 4,5**. Ce pH permet de séparer les aliments en deux groupes par rapport à leur aptitude de permettre la croissance des principales bactéries pathogènes. Au dessous de ce pH les risques sanitaires sont minimes. Chaque micro-organisme est caractérisé par un seuil de pH en dessous duquel il ne se développe pas.

En résumé :

- Si $6 < pH < 7.5$ tous les micro-organismes survivent (pH de la plupart des aliments),
- Si $4.5 < pH < 6$ seules les micro-organismes acidotolérants survivent (c'est le pH de beaucoup de fruits),
- Si $2.2 < pH < 4.5$ l'activité et la survie des micro-organismes très limitées (concentré de fruits : citrons).

b) L'activité de l'eau (A_w) :

L'eau contenue dans les aliments peut exister sous deux formes : **H₂O libre et H₂O liée**.

H₂O liée : Elle fait partie intégrante des cellules vivantes, tout comme les protéines et hydrates de carbone (c'est-à-dire elle est constitutive de la matière). Les bactéries sont incapables de l'utiliser. Certaines méthodes sont utilisées pour diminuer son taux. L'addition de solutés, d'ions et de colloïdes hydrophiles (gels) diminuent la quantité d'H₂O liée, tout comme la congélation cristallise l'eau.

H₂O libre : Nécessaire à toute croissance bactérienne, elle se trouve à l'intérieur mais surtout à l'extérieur des cellules (autrement dit, elle s'utilise pour diverses réactions et le développement de différents microorganismes). La mesure d'eau disponible dans un aliment (quantifié par A_w) peut être utilisée pour prévoir le type de bactéries qu'on peut rencontrer.

Les bactéries ont besoin de plus d'eau libre que les levures et moisissures pour croître. A cet usage on donne dans le tableau ci-dessous les valeurs minimales et les besoins en eau de certains microorganismes à leur température optimum :

- **Besoins en eau de certains microorganismes à leur température optimum**

Microorganismes	A _w minimale	Espèces microbiennes	A _w minimale
La majorité des bactéries	0.91	<i>Clostridium botulinum</i>	0.93
La majorité des levures	0.88	<i>Staphylococcus aureus</i>	0.85
La majorité des moisissures	0.80	<i>Salmonelles</i>	0.93
Bactéries halophiles	0.75	<i>Escherichia coli</i>	0.96
Levures osmophiles	0.60		

- Espèce osmophile : espèce résistant à une forte concentration en sucre
- Espèce halophile : espèce résistant à une forte concentration en sel

L'activité de l'eau permet de mettre en œuvre une stratégie de protection des aliments en contrôlant les détériorations physico-chimiques, enzymatiques et microbiennes.

- $0 < A_w < 1$, elle dépend notamment de la présence d'éléments dissous (sucre, sel) et de la température \neq teneur en eau
- $A_w < 0.62$ aucun microorganisme ne peut se multiplier (survie possible)

Il est à signaler que les techniques de conservation comme la déshydratation, le salage, l'addition de sucres (confitures), ou congélation reposent en grande partie sur la diminution de l' A_w

La notion de disponibilité de l'eau (eau libre) dans un aliment peut être définie aux moyens de :

- L'Humidité Relative d'Equilibre (HRE) :

$$\text{HRE} = \frac{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau de l'aliment à la température } \theta}{\text{Pression partielle de la vapeur d'eau saturante à la température } \theta} \times 100$$

$$\text{HRE} = \frac{P_w}{P_{w0}} \times 100 \quad (1)$$

- Ou l'activité de l'eau :

$$A_w = \frac{P_w}{P_{w0}} = \frac{\text{HRE}}{100} \quad (2)$$

L'activité de l'eau A_w et l'humidité relative d'équilibre **HRE** à la même température **T** sont donc liés. Ainsi, une humidité relative de 80 % correspond à une activité de l'eau de 0,8.

La A_w est d'autant plus faible que les forces de liaisons sont intenses et tend au contraire vers l'unité lorsque l'eau se rapproche de l'état libre. Elle permet, en outre, de

prévoir et d'éviter les détériorations physicochimiques, les activités enzymatiques et la prolifération des micro-organismes. En ce qui concerne ces derniers, les bactéries, les levures et les moisissures ne peuvent se développer qu'à des A_w supérieures respectivement à 0,91, 0,88 et 0,80 (voir ci-dessus le **Tableau 1**).

La teneur en eau et la A_w sont des grandeurs liées – plus un aliment est riche en eau, plus la A_w doit être forte –, mais pas forcément linéairement corrélées. Des produits de même teneur en eau peuvent avoir des A_w différentes (voir ci-dessous quelques données chiffrées sur A_w).

Tableau 1 : Teneurs en eau et activités de certains aliments

Aliment	Teneur en eau	A_w
Légumes frais	95%	0,99
Légumes surgelés	94 %	0,81
Confiture	44 %	0,86
Lait concentré sucré	26 %	0,83

c) Température :

On distingue différentes catégories de micro-organismes selon leur optimum de croissance en fonction de la température :

- Psychrophiles : **-5 °C à +15°C**
- Mésophiles : **+ 15 °C à +40 °C**
- Thermophiles : **+40 °C à +55°C**

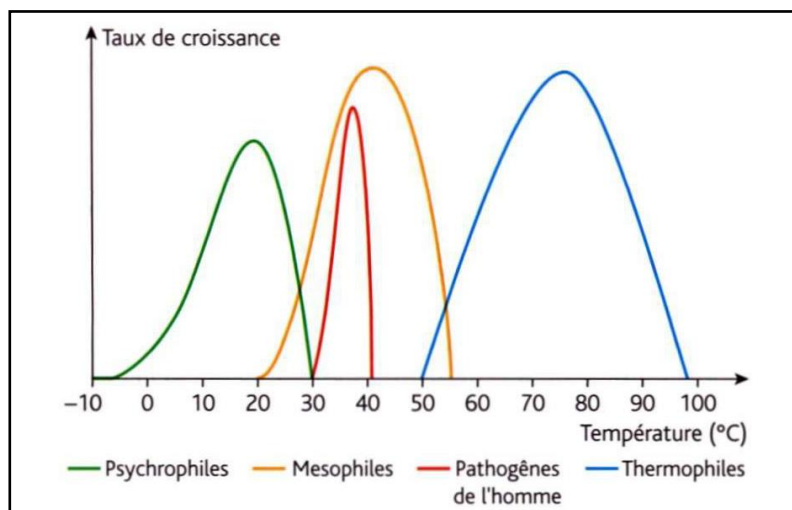


Figure 1: Domaines de température des différents micro-organismes

Selon la température le dédoublement (deux fois en quantité) sera rapide comme le montre le tableau suivant dans le lait cru :

Exemples :

- **Temps de dédoublement (t_g) en fonction de la température :**

Température	7°C	20°C
Streptococcus	≥ 12h	1,3 h
Pseudomonas	4h	1,3 h
Escherichia	≥ 6	1,1 h

Le deuxième tableau suivant indique par ailleurs la croissance bactérienne dans le lait cru après 24 h, en fonction de la température :

- **Croissance bactérienne en 24 h en fonction de la température ($N_0 = 2000$) :**

Température (°C)	N_{24h}
4	2500
10	12000
20	500 000
35	2 500 000

d) Composition de l'aliment :

- Les aliments riches en hydrates de carbone (pain, confiture, fruits...) sont favorables aux champignons (génèrent peu d'odeurs en général)
- Les aliments riches en protéines et/ou graisses (viande, beurre...) sont favorables aux bactéries
- Les processus de dégradation des aliments sont résumés dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Processus de dégradation des aliments

Substrat	Aliment	Processus	Produits et effets
Pectine (polyoside)	Fruits/légumes	Pectinolyse	Méthanol, acides uroniques <i>Perte de structure, pourriture molle</i>
Protéines	Viande	Protéolyse, désamination	Amines biogènes (histamine, putrescine, cadaverine), H ₂ S, ammoniac, indole <i>Amertume, aigrissement, odeur nauséabonde, viscosité</i>
Lipides	Beurre	Hydrolyse des acides gras	Glycerol, acides gras mixtes <i>Rancissement, amertume</i>
Sucres	Féculeux	Hydrolyse	Acides organiques, alcools <i>Aigrissement, acidification</i>

II.3 PROCEDES DE CONSERVATION DES ALIMENTS

La conservation des aliments vise à préserver leur **comestibilité** et leurs **propriétés gustatives et nutritives**. Elle implique notamment d'empêcher la croissance de microorganismes et de retarder l'oxydation des graisses qui provoque le rancissement. Les procédés courants de **conservation** des aliments reposent principalement sur un **transfert d'énergie (chaleur) ou de masse (matière)** qui ont pour objectif d'allonger la durée de vie des produits alimentaires (**pasteurisation et stérilisation, séchage, déshydratation osmotique, réfrigération et congélation**) ou de les **transformer** par le jeu de **réactions biochimiques ou de changement d'état** (cuisson, fermentation, obtention d'état cristallisé ou vitreux...).

II.3.1 PROCEDES THERMIQUES

Le traitement des aliments par la chaleur est aujourd'hui le plus important procédé de conservation de longue durée. Il a pour objectif de détruire ou d'inhiber totalement les enzymes et les microorganismes et leurs toxines, dont la présence ou la prolifération pourrait altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à l'alimentation humaine. On distingue la **pasteurisation** lorsque le chauffage est **inférieur à 100°C** et la **stérilisation** lorsqu'il est **supérieur à 100°C**.

II.3.1.1 PROCEDES PAR AJOUT DE LA CHALEUR

A. LA PASTEURISATION

La pasteurisation est un **traitement thermique limité**, mis au point par Pasteur en 1863. Elle consiste à soumettre les aliments à une température **inférieure à 100 °C**, suivi d'un **brusque refroidissement**. Durant cette opération, tous les **microorganismes ne sont pas éliminés (détruits)**. Il s'agit de ralentir le **développement des germes encore présents (c.à.d. tous les micro-organismes peu résistants à la chaleur sont tués)**. Les aliments pasteurisés sont ainsi habituellement conservés **au froid (+4°C)**. Ce procédé vise à préserver au maximum les caractéristiques physiques, biochimiques et organoleptiques (sens : gout et odeur) du produit alimentaire. Il concerne, par exemple, le **lait et les produits laitiers, les jus de fruits, le vinaigre, le miel...**

On différencie plusieurs types de pasteurisation selon le couple **temps-température**. Ces derniers permettront d'obtenir une valeur pasteurisatrice (voir tableau 3 ci-contre).

Tableau 3 : Différents types de pasteurisation et barème de pasteurisation

	Pasteurisation basse	Pasteurisation haute	Flash pasteurisation
Température	63 à 65°C	82 à 88°C	90 à 95°C
Temps	20 à 30 minutes	Quelques dizaines de secondes	Quelques secondes
Aliments	Bières Ovo-produits	Glaces Semi-conserves	Lait, Jus de fruits (évite la dégradation des vitamines)
Cas particulier		Lait : 15 secondes à 72°C	

Le couple **temps-température** est le **barème de pasteurisation** appliqué durant le procédé de pasteurisation.

Le procédé de pasteurisation s'opère dans un appareil nommé, **pasteurisateur**. Ce sont en fait **des échangeurs de chaleur**. On passe le produit alimentaire de façon continue entre des plaques chauffées ou par des tuyaux, ou on le chauffe à la température désirée pendant une période déterminée. Après cela, a lieu la réfrigération rapide.

La durée de conservation est maximum **14 jours fermés, 2 à 3 jours ouverts**.

Il est à signaler qu'on ne fait le choix d'une pasteurisation que dans certains cas ; seulement quand l'aliment offre peu de **risques bactériologiques** du fait de ses caractéristiques propres (par exemple l'acidité dans les jus de fruits) ou bien si on ne cherche à éliminer que quelques **micro-organismes pathogènes** (comme *Mycobacterium tuberculosis* dans le lait). **Un traitement plus long à plus haute température risque de lui faire perdre ces qualités organoleptiques.**

Fonctionnement d'un pasteurisateur à plaques :

Ce sont des plaques plus ou moins gaufrés ou cannelés, collés les unes aux autres entre lesquels circulent : le fluide chauffant (vapeur, eau chaude) ; l'aliment (**Figure 2**).

Ce type d'appareil est composé de trois parties (**Figure 3**) :

- 1- partie chauffante
- 2- partie eau glacée
- 3- échange et récupération

La section chauffage permet de chauffer le produit à une température donnée pendant un certain temps, appelé le temps de chambrage, à l'aide de vapeur ou d'eau chaude.

La section de refroidissement permet de refroidir le produit afin d'éviter une recontamination, à l'aide d'eau glacée. La section échange et récupération permet de préchauffer le produit et prérefroidir en même temps.

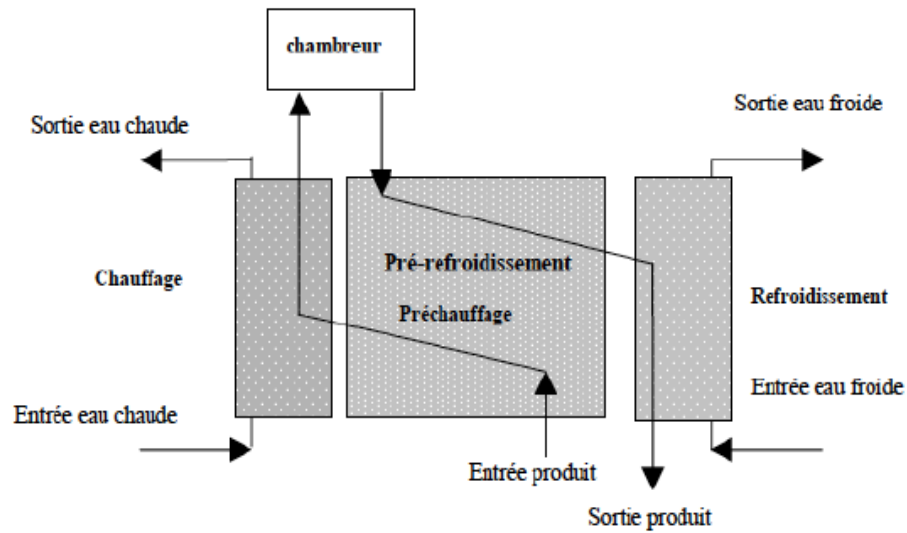


Schéma d'un pasteurisateur

- 1 : Entrée produit non traité
- 2 : Sortie produit traité (produit pasteurisé)
- 3 : Entrée eau chaude
- 4 : Sortie eau chaude

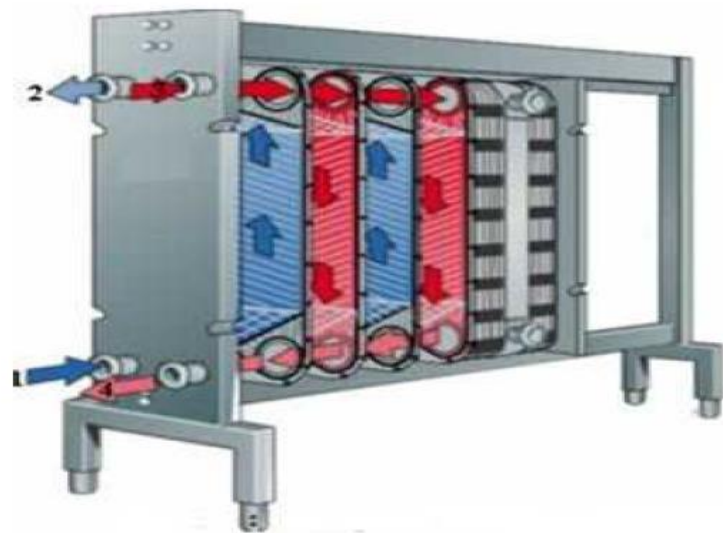


Figure 2 : Pasteurisateur à plaques

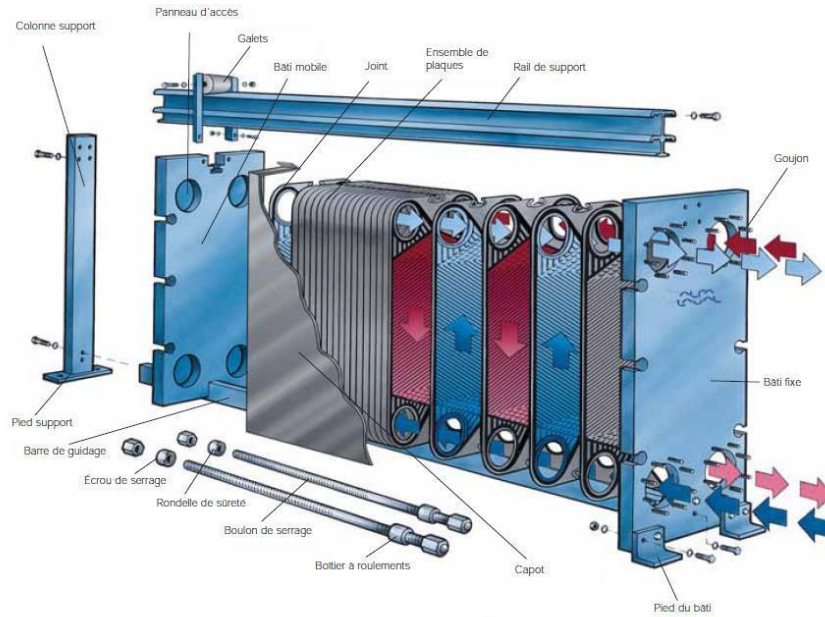


Figure 3 : Eléments d'un pasteurisateur à plaques démonté

B. STERILISATION

Ce procédé consiste à détruire totalement tous les micro-organismes et les spores reproductrices de l'aliment par ébullition prolongée de **15 à 20 min** à une température comprise entre **100 °C et 120 °C**. L'opération de stérilisation fait l'emploi d'une combinaison temps-température plus élevée que la pasteurisation. Autrement dit, elle peut varier entre 15 min à 121°C et quelques secondes à 140°C. Parmi les aliments stérilisés, on peut citer : **le lait, les fruits et les légumes**.

La Température de stérilisation varie en fonction des caractéristiques des aliments (**composition, pH et la charge microbienne initiale**).

En fait, plus un aliment est acide, plus les micro-organismes sont rapidement détruits par la chaleur. A titre d'exemple, dans un jus de fruit ayant un **pH < 4,5**, tous **les microorganismes seront détruits** tandis que pour un produit ayant un **pH > 4,5** (produits carnés), les micro-organismes résistants à plus de **100°C ne seront pas détruits**. Dans ce cas, on parle des semi-conserves.

L'inconvénient majeur de ce traitement est la perte de 30% des vitamines et la modification du goût.

Cependant son avantage permet la conservation des aliments **plusieurs mois, voire plusieurs années sans altération** s'ils sont exposés à l'abri d'une chaleur excessive.

Le procédé de stérilisation se déroule dans des stérilisateur hydrostatiques. Ce sont en fait des autoclaves fonctionnant en continu et sous pression pour la production des aliments en boîtes ((**Figures 4 et 5**)).

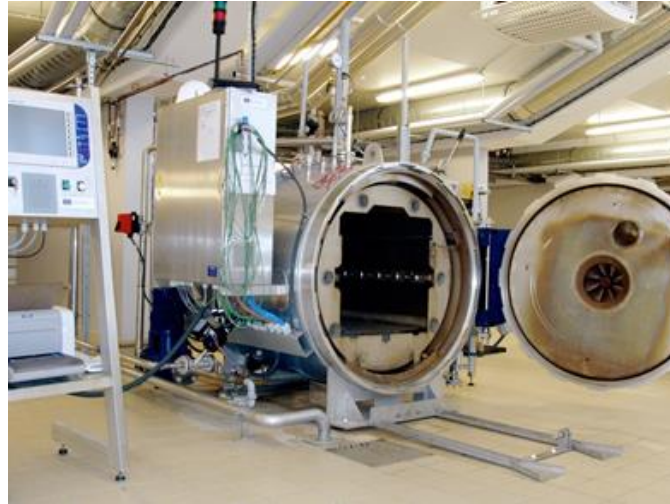


Figure 4 : Autoclave pilote



Figure 5 : Batterie d'autoclaves industriels

Fonctionnement d'un autoclave :

La figure 6 ci-dessous représente schématiquement un autoclave et ses différentes entrées et sorties.

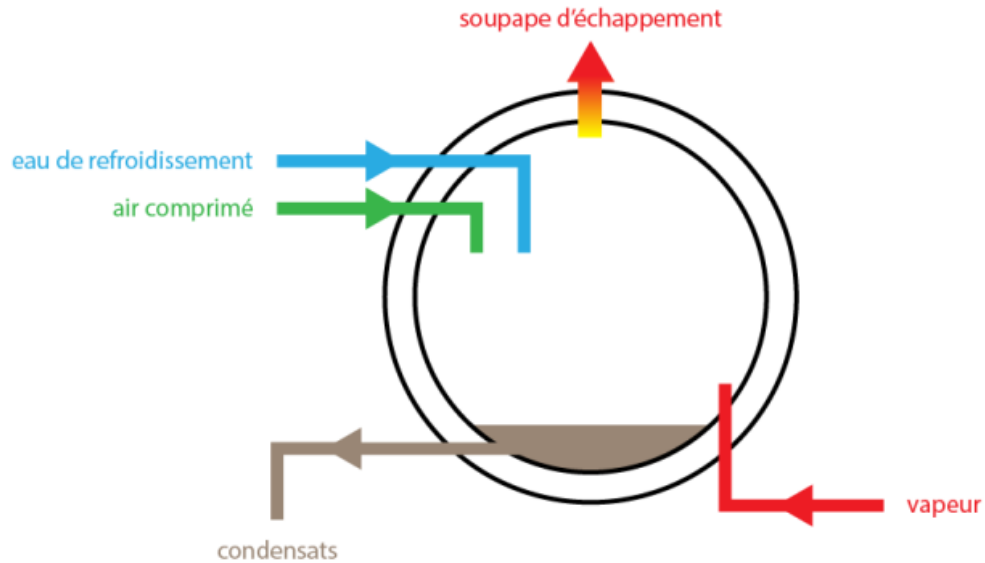


Figure 6 : Schéma d'un autoclave

- **Les éléments d'un autoclave :**

- **Vapeur** : la vapeur d'eau est la source de chaleur. Son admission est régulée par la pression et/ou la température dans l'autoclave.

Souple d'échappement : une ou plusieurs soupapes jouent plusieurs rôles.

- **Échappement** : il s'agit là de la purge de l'air en début de traitement puis de la remise à pression atmosphérique en fin de traitement.
- **Régulation** : maintien de la pression de consigne dans l'autoclave.
- **Sécurité** : sur tout autoclave une soupape est réglée pour s'ouvrir avant le dépassement de la pression admissible par l'appareil.
- **Condensats** : une vanne permet d'éliminer régulièrement la vapeur qui s'est condensée (condensats) en donnant sa chaleur au produit.
- **Eau de refroidissement** : en fin de traitement le refroidissement des produits est assuré par l'aspersion d'eau réfrigérée.
- **Air comprimé** : en début de refroidissement la pression dans l'enceinte chute brusquement à cause de l'arrêt d'admission de vapeur et de la chute de température créée par l'eau froide. Mais le produit au cœur des boîtes reste encore à haute température. Il y a donc le risque de voir l'eau contenue se vaporiser et faire exploser les boîtes. Pour éviter cela de l'air comprimé est injecté dans l'enceinte de

façon à maintenir la pression de consigne jusqu'à ce que la température des produits soit partout inférieure à 100°C.

C. APPERTISATION

Ce procédé a été mis au point par **Nicolas Appert** en **1810** pour la conservation des jus de fruits. En effet, l'appertisation est un procédé de conservation qui consiste à **enfermer des aliments périssables**, d'origine animale ou végétale dans **un récipient hermétiquement clos** et à **les soumettre à un chauffage** assurant la destruction ou l'inactivation des enzymes, des toxines et des micro-organismes, pathogènes ou non pathogènes, capables de proliférer dans les aliments, aux températures normales d'entreposage et de distribution, sans réfrigération. Après la fermeture des boîtes et selon la nature du produit alimentaire, ce dernier est porté pendant 30 min à 110°C, 3 min à 120°C, 20 sec à 130°C, 2 sec à 140°C. Ceci permet une conservation pendant des mois, voire plusieurs années.

- Parmi les aliments appertisés, on peut citer : **les fruits, les légumes, les viandes, les poissons, plats préparés...etc**
- L'appertisation permet la préservation des qualités organoleptiques et nutritives des denrées alimentaires.

Description d'un autoclave discontinu statique simple (Figure 7) :

L'autoclave est l'appareil classique de l'appertisation.

C'est une enceinte (cuve) fermée hermétiquement, qui permet de stériliser un produit à une température élevée sous pression ($T^{\circ} > 100^{\circ}\text{C}$). Le chauffage est réalisé grâce à la vapeur saturante ou par de l'eau surchauffée. La pression est soit simplement liée à une augmentation de température, soit régulée en plus par injection d'air comprimée (contrepression).

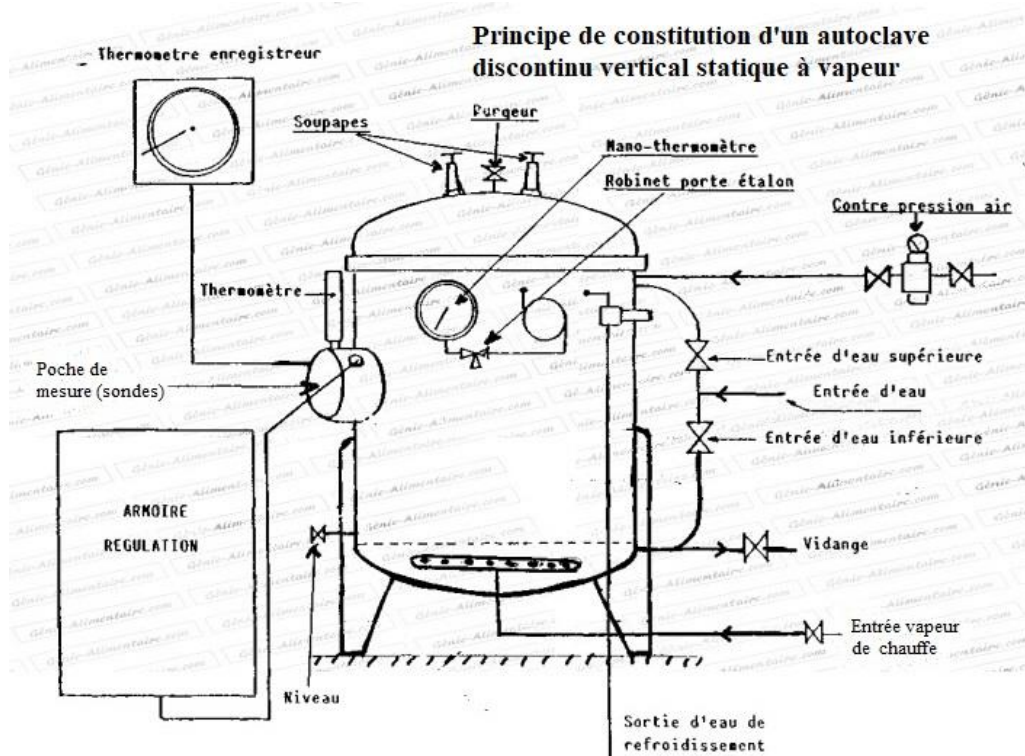


Figure 7 : Schéma d'un autoclave d'appertisation

D. ULTRA HAUTE TEMPERATURE (UHT)

Ce procédé consiste à **chauffer le produit** à une température assez élevée, **entre 135°C et 150°C**, pendant **un temps très court, entre 1 à 5 secondes**. Le produit stérilisé est ensuite refroidi puis emballé aseptiquement pour obtenir un conditionnement exempt de microbes. Ce processus est utilisé pour la stérilisation des produits liquides (**lait, jus de fruits, ...**) ou de consistance plus épaisse (**desserts lactés, crème, jus de tomate, soupes, ...**). A titre d'exemple, le lait est porté en flux continu à une température entre (140-150 °C) durant un temps très court (2-3 secondes).

Par ailleurs, ce procédé met en œuvre soit le **chauffage indirect** dans **des échangeurs tubulaires** ou à **plaques** soit le **chauffage direct** par **contact entre le produit et de la vapeur** d'eau sous pression.

La brièveté du procédé **UHT** permet de conserver les qualités organoleptiques en détruisant entièrement les micro-organismes et de manière efficace. Cependant le temps abîme le produit.

E. BLANCHIMENT

Le blanchiment est un traitement thermique préalable pour les aliments congelés, déshydratés ou pasteurisés. Ce procédé permet **d'inactiver les enzymes** (responsable du **brunissement enzymatique** ou de modification des couleurs naturelles de certains fruits ou légumes), en soumettent le **produit à un bain d'eau chaude ou de vapeur** pendant une durée de temps courte (**temps < 5 min**) et à une température modérée (**entre 60 et 100 °C**).

Ce procédé offre parfois un autre intérêt, notamment celui d'améliorer la texture. Ainsi le blanchiment des tomates permet de préserver la couleur rouge et de ramollir les tissus, ce qui facilite les opérations ultérieures (obtention de sauce, de concentré ou de jus) en maintenant la couleur fraîche de la tomate. Les haricots verts soumis à un blanchiment avant congélation gardent une belle couleur verte et sont rendus plus tendre.

Le blanchiment permet en outre de :

- Dilater les cellules végétales par ramollissement du fruit ou de légume, ce qui provoque l'élimination de l'oxygène de l'air intracellulaire (responsable de la corrosion ultérieure des matériaux de conditionnement ou du bombage chimique des boites.
- Réduire la charge microbienne à la surface du fruit et du légume et arrêter les fermentations.

Dans la conservation des fruits et des légumes, le blanchiment est considéré comme un mal nécessaire et présente quelques inconvénients dont le plus important est la perte de substances solubles par lessivage et par diffusion (protéines, sucre, vitamines, minéraux) d'où une diminution de la valeur nutritive du produit.

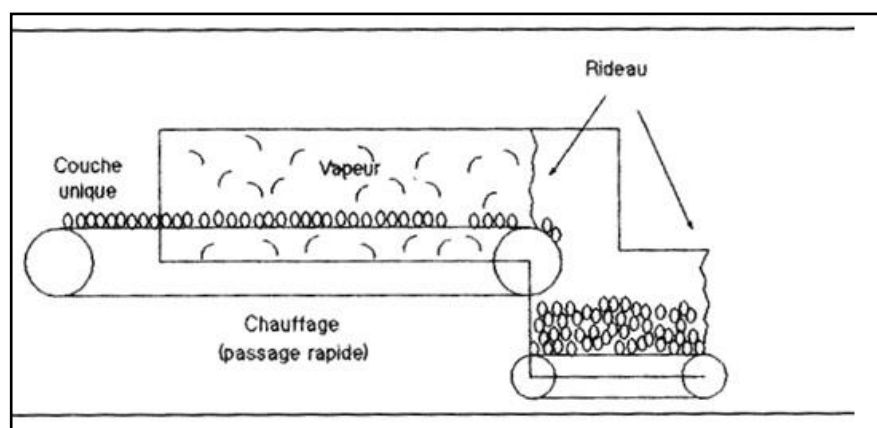


Figure 8 : Schéma d'un appareil de Blanchiment à la vapeur

L'appareil présenté sur la figure 8 est le plus simple des appareils utilisés: les légumes, par exemple, circulent sur un tapis dans un tunnel et traversent une atmosphère de vapeur. Le temps de séjour dans la vapeur est réglé par la vitesse du tapis.

II.3.1.2 PROCÉDES THERMIQUES PAR SOUSTRACTION DE CHALEUR

Le froid **arrête** ou **ralentit l'activité cellulaire**, les **réactions enzymatiques** et le **développement des micro-organismes**. Il **prolonge** ainsi la **durée de vie des denrées alimentaires** en limitant leur altération. Néanmoins, les **micro-organismes** éventuellement présents **ne sont pas détruits et peuvent reprendre leur activité dès le retour à une température favorable**. En général, les basses températures retardent ou empêchent la détérioration des aliments.

Ces procédés de froid sont **basés en partie sur une diminution de l'activité de l'eau dans l'aliment**. En effet, **l'activité de l'eau A_w de la glace diminue avec la température**. Elle passe de $A_w = 1$ à **température ambiante** à $A_w = 0.95$ à -5°C et à $A_w = 0.82$ à -20°C .

A. REFRIGERATION

- Ce procédé consiste à abaisser la température pour prolonger la durée de conservation des aliments. En effet, à l'état réfrigéré, les cellules des tissus animaux et végétaux restent en vie pendant un temps plus ou moins long, et **les métabolismes cellulaires (réactions chimiques et enzymatiques) sont seulement ralentis**.
- La température des aliments réfrigérés est **comprise entre 0 et $+4^\circ\text{C}$** pour les denrées périssables les plus sensibles.
- Avantages : augmenter la DLC tout en maintenant ses caractéristiques sensorielles (principalement couleur, saveur et texture) et leurs qualités nutritionnelles.
- La réfrigération n'est efficace que si l'on respecte 3 éléments suivants :
 - **réfrigérer un aliment sain,**
 - **réfrigérer rapidement,**
 - **réfrigérer en continue** (chaîne de froid : depuis la récolte jusqu'à la consommation).
- La durée de conservation reste limitée. Elle est variable d'un produit à un autre.
- **Applications de la réfrigération pour quelques aliments :**
 - Œuf en coquille : $T = -1-0^\circ\text{C}$; $A_w = 0,9$; $DPC = 6-7$ mois
 - Lait cru : $T = 0-4^\circ\text{C}$; $DPC = 2$ jours
 - Lait pasteurisé : $T = 4-6^\circ\text{C}$; $DPC = 7$ jours
 - Viande hachée : $T = 4^\circ\text{C}$; $A_w = 0,85-0,95$; $DPC = 1$ jour

- Pomme de terre : $T = 2-3\text{ °C}$; $A_w = 0,9-0,95$; $DPC = 5-8$ mois
- Citron vert : $T = 10-14\text{ °C}$; $A_w = 0,85-0,9$; $DPC = 1-4$ mois
- Poivron doux : $T = 7-10\text{ °C}$; $A_w = 0,9-0,95$; $DPC = 1-3$ semaines

Les aliments sont refroidis dans une **cellule de refroidissement (Figure 9)** qu'est dotée d'un thermostat précis et d'une sonde de température à cœur pour éviter la congélation ou la surgélation. Elle permet ainsi de refroidir extrêmement rapidement les aliments afin de les conserver sur une longue durée, sans perte de saveur ni de nutriments.

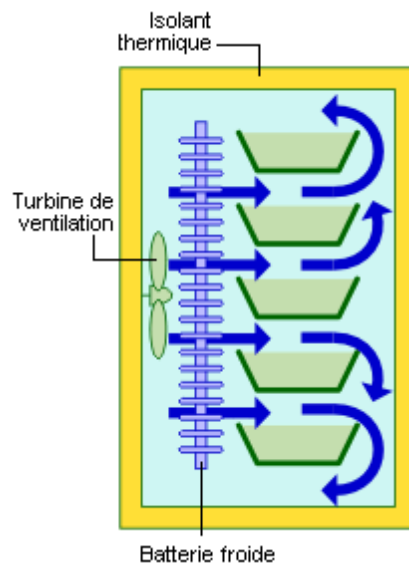


Figure 9 : Cellule de refroidissement rapide de produits alimentaires

B. CONGELATION

- La congélation maintient la **température au cœur de la denrée jusqu'à -18°C** . Ce procédé provoque la **crystallisation en glace de l'eau** contenue dans les aliments. On assiste alors à **une diminution importante de l'eau disponible**, soit à une baisse de **l'activité de l'eau (A_w)**. Ceci **ralentit ou stoppe l'activité microbienne et enzymatique**. La congélation permet donc la conservation des aliments à **plus long terme que la réfrigération**. Elle s'effectue souvent dans **une chambre froide**.
- La formation de **cristaux de glace** dans le produit est souvent **source de détérioration**, en particulier de **la texture** lorsqu'il y a beaucoup **d'eau et peu de cellulose**. Les aiguilles tranchantes des cristaux de glace peuvent percer et déchirer la

paroi des cellules peu résistantes et favoriser une certaine exsudation lors de la décongélation.

- les durées de congélation des aliments peuvent varier en fonction du produit congelé: **1 mois pour le pain**, de **3 mois** pour les **poissons gras et les crustacés**, de **6 mois**
- pour les **poissons maigres**, de **6 à 8 mois** l'agneau et le veau, de **8 à 10 mois** pour les **fromages**, les **fruits et légumes** et de **12 mois** pour le **bœuf** et les volailles.

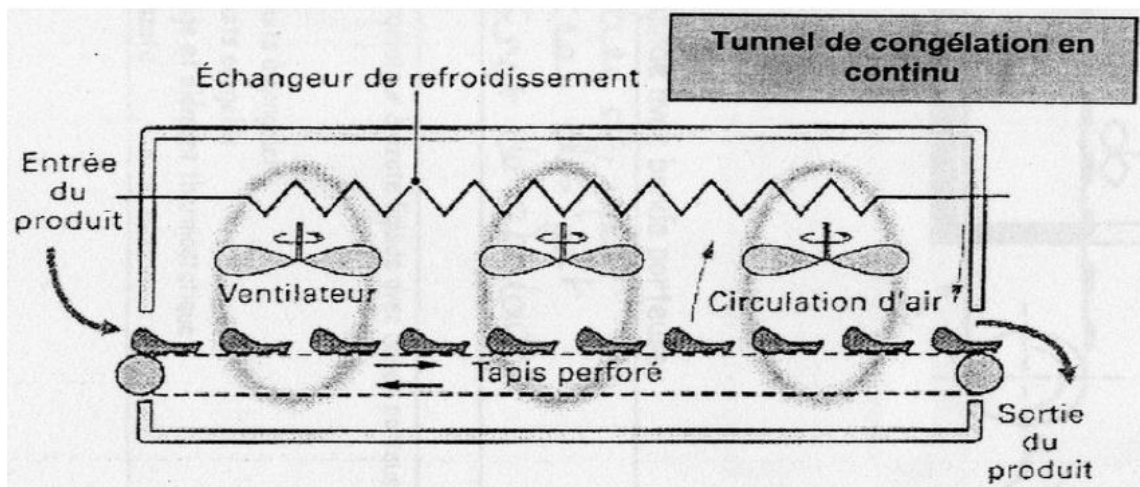


Schéma d'un tunnel de Congélation

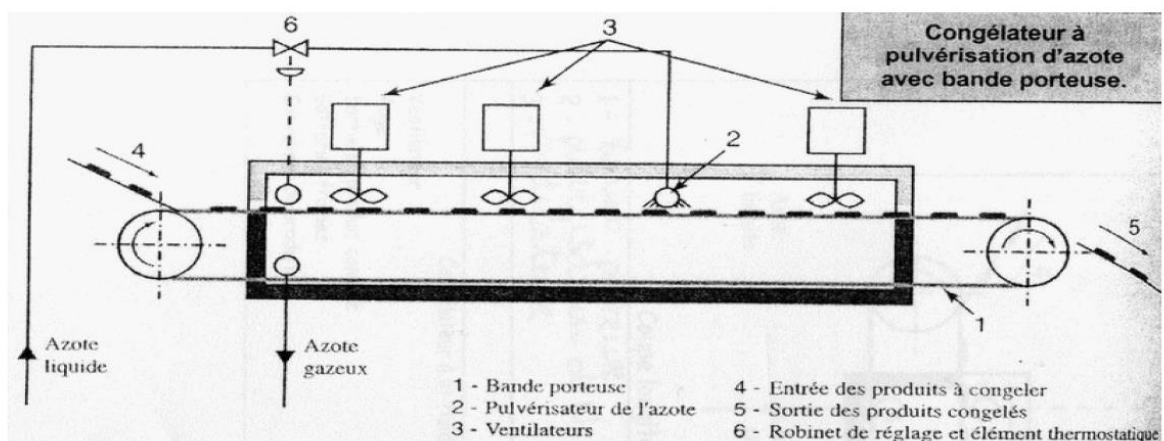


Schéma d'un Congélateur à pulvérisation d'azote

C. SURGELATION

- La surgélation, appelée aussi **congélation rapide**, est un procédé industriel qui consiste à **refroidir brutalement (quelques minutes à une heure)** des denrées alimentaires en les exposant intensément à **des températures en deçà - 18 °C (-35-196 °C)**. Grâce à ce procédé, l'eau contenue dans les cellules **se cristallise finement limitant ainsi la destruction cellulaire**. Une fois surgelés, les produits doivent être stockés à $T^{\circ} \leq -18^{\circ} \text{C}$. Seul **un faible exsudat** se produit lors de **la décongélation**.
- La surgélation est réalisée, selon les produits, en quelques minutes : **5 à 7 minutes** pour les **haricots verts** et environ **15 minutes** pour un **poulet entier**.
- **Les produits traités** conservent toute leur texture, leur saveur et peuvent être conservés plus longtemps (jusqu'à 30 mois pour les légumes).
- Les Aliments surgelés sont les mêmes que ceux qui peuvent être congelés.
- Les produits alimentaires sont surgelés dans un tunnel de surgélation (**Figure 10**).

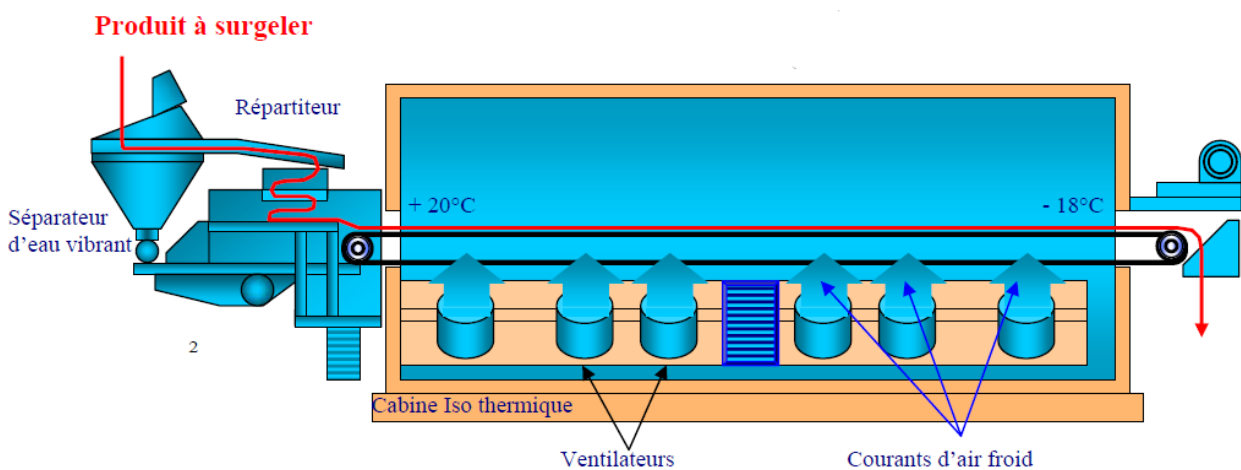


Figure 10 : Schéma d'un tunnel de Surgélation

II.4 PROCÉDES PAR MODIFICATION DE L'ACTIVITÉ DE L'EAU (A_w)

- Grâce à ces procédés, *l'activité de l'eau* (A_w) **diminue**, ce qui empêche la **prolifération des micro-organismes**, et **ralentit la plupart des réactions chimiques ou enzymatiques** de détérioration.

II.4.1 MODIFICATION DE A_w AVEC LES PROCÉDES THERMIQUES

A. SECHAGE OU DESYDRATATION TOTALE

- Ce procédé consiste à **éliminer totalement l'eau** contenue dans l'aliment (**solide ou liquide**) par une action combinée libre de **chaleur et de ventilation** afin de le **transformer en produit solide sec** (très faible humidité). La **durée de conservation** dépend du degré de déshydratation et aussi de la qualité de l'emballage : **DLUO** (*Date Limite Utilisation Optimale*) en **mois** ou en **années**.
- L'élimination de l'eau s'effectue dans **un séchoir**, par l'application de différentes méthodes. Parmi lesquelles on peut citer les suivantes :
 - **Par séchage solaire (ou l'air courant)** : l'aliment est exposé à un courant d'air chaud (et d'humidité faible) généré grâce au soleil. Ceci lui permet de capter l'eau contenu dans le produit à sécher et facilite aussi son évaporation.
 - **Par séchage sur une plaque chauffante** : le produit alimentaire à sécher est mis sur une plaque chauffée à une certaine température selon sa nature.
 - **Par séchage par radiation infrarouge** : la denrée alimentaire est exposée aux rayonnements infra-rouge.
- Le procédé de séchage entraîne des modifications plus au moins importantes des propriétés nutritives de l'aliment selon les molécules considérées. A titre d'exemples :
 - Pertes durant le chauffage de certains arômes (acides aromatiques) relativement volatils et de la vitamine C.
 - Une faible évolution des qualités organoleptiques (déshydratation faible, voire quasi inexistante, des glucides et des protéides)
- *Les produits alimentaires à sécher sont classés en plusieurs groupes* :
 - Les substances simples (souvent des matières purifiées) telles que les saccharides et l'amidon.
 - Les substances liquides : solutions, suspensions, émulsions etc...
 - Les aliments ayant gardés leur propres structures, tels que la viande, le poisson, les légumes blanchis, les fruits etc...

B. LYOPHILISATION OU SECHAGE PAR SUBLIMATION

- La **lyophilisation** est un procédé inventé par *F. Bordas* et *A. d'Arsonval* en 1906. Il permet d'obtenir **un produit sec** en préservant sa **forme, sa couleur et ses qualités organoleptiques**. Cette technique de séchage est assez différente des autres méthodes. L'eau contenue dans le produit est congelée puis retirée par **sublimation (passage de l'eau de la phase solide (glace) à la phase gazeuse (vapeur d'eau))**.
- Le procédé, s'opérant dans **un lyophilisateur**, comporte principalement quatre opérations :
 - 1- Préparation du produit : lavage, broyage ou découpage, blanchiment ou pasteurisation,
 - 2- Congélation à basse température : séparation de l'humidité des substances solubles. L'eau cristallise sous forme de cristaux, tandis que les substances qui étaient dissoutes sont fixées entre ces cristaux.
 - 3- Séchage sous vide : Elle s'opère en deux étapes : **sublimation** ou le **séchage primaire**, dans laquelle l'élimination de **80-90% d'eau** est effectuée sous pression réduite (pour le maintien de l'aliment à température constante). Ensuite, la **désorption** ou le **séchage secondaire**, qui permet l'élimination des **10% de l'eau liée** restants et, en fin de processus, l'obtention d'un produit contenant moins de **2% d'humidité**.
 - 4- L'emballage du produit : il s'effectue sous vide ou **sous atmosphère de gaz inerte** (N₂ ou He) pour éviter toute **oxydation ou détérioration** de la denrée alimentaire.
- Impact recherché sur le développement microbien :
 - **Blocage des réactions enzymatiques** pendant la déshydratation et donc d'empêcher une fermentation.
 - **Empêcher les bactéries aérobies** de se développer.
- Applications : Ce procédé ne peut être appliqué que pour **la conservation des aliments à haute valeur ajoutée**. Quelques exemples de produits qui sont conservés avec la lyophilisation : **l'extrait du café soluble (Nescafé), la viande du poulet, les champignons, le lait entier, fruits délicat, herbes aromatiques, etc...**

C. FUMAGE ou FUMAISON

- Dans ce procédé, l'aliment est exposé à la fumée provenant d'une combustion lente de sciure de bois (hêtre, frêne ou genièvre) à une température comprise entre **20 -30 °C**

après une opération de salage. Durant le processus de fumage, il se produit une **élimination partielle de l'eau** dans l'aliment et une **imprégnation des composés de fumée** (tels les aldéhydes, les phénols et les acides) **en lui-même**. Par conséquent, le produit se transforme : il s'**aromatise, se colore**, subit une **modification de sa texture** et se **conserve** grâce à **l'action combinée de la déshydratation et des antiseptiques contenus dans la fumée**.

- Le fumage est surtout utilisé pour la conservation de certaines viandes ou certains poissons.

D. CONCENTRATION PAR EVAPORATION OU EVAPO- CONCENTRATION

- Cette technique consiste à augmenter la masse d'un produit par unité de volume par **déshydratation partielle**. Ce procédé ne traite que les produits liquides très humides.
- *Cette technique est appliquée pour :*
 - **La concentration du lait**, entier ou écrémé (opération en vue d'une commercialisation ou d'un séchage)
 - **La concentration des jus de fruits** (opération pour réduire les frais de transport et de stockage, mais aussi pour une commercialisation).
 - De même, **les jus de légumes** pour potages en sachets, ainsi que **les gélatines alimentaires** obtenues à partir des os, sont également concentrés par évaporation.
- L'évapo-concentration est une technique de déshydratation **moins couteuse en énergie que le séchage**. Elle s'opère dans **des évaporateurs**.

II.4.2 MODIFICATION DE A_w AVEC ADJONCTION (ADDITION) DE PRODUITS CHIMIQUES

- Ces **procédés**, considérés comme **indirects**, consistent à **lier l'eau disponible dans l'aliment** par ajout **d'agents chimiques dépresseurs de l'activité de l'eau (A_w)**.
- Les agents dépresseurs de l'activité de l'eau n'appartiennent à aucune famille chimique particulière. L'activité de l'eau dépend de **la nature et de la quantité des substances en solution** dans la phase aqueuse de la denrée alimentaire (ou de la solution).
- Les **dépresseurs de A_w** les plus utilisés en industrie agroalimentaire sont les **sels**, notamment le *NaCl*, et les **glucides**, notamment **les mono- et disaccharides**.

- Le tableau 4 ci-dessous donne quelques valeurs de A_w de solutions de différentes concentrations de *NaCl* et de saccharoses mesurées à 25 °C.

Tableau 4 : A_w de solutions de NaCl et de saccharose (concentration en g/100 g d'eau, A_w mesurée à 25°C)

A_w	<i>NaCl</i>	<i>Saccharose</i>
0,99	1,75	11
0,96	7,01	25
0,94	10,34	93
0,92	13,5	120
0,90	16,5	144
0,85	23,6	208

- L'utilisation des **sels et des sucres** compte parmi les procédés les plus **simples et les moins coûteux pour réduire A_w** d'un aliment et **améliorer** ainsi sa **conservabilité**. Cependant, elle ne peut être envisagée que dans le cas de **préparations spéciales** où le **sel ou le sucre jouent un rôle déterminant dans les caractéristiques organoleptiques de l'aliment**. C'est le cas par exemple des **anchois salés, des câpres au sel, des sirops et des produits de la confiserie**.

A. SALAGE

- La conservation par le sel ou salage consiste à soumettre une denrée alimentaire à l'action du sel :
 - Soit en le **répandant directement à la surface de l'aliment (salage à sec)** : Dans cette opération, une **concentration en sels égale à 15%** environ du poids de la denrée alimentaire est ajoutée pour provoquer la déshydratation.
 - Soit en **immergeant le produit plus ou moins longtemps dans une solution d'eau salée (saumurage)** : L'aliment est mis dans **une saumure** composée de **sel, d'eau et de divers additifs (aromates, sucres, nitrates,...)**. La saumure agit **par osmose** *c.-à.-d.* une partie du sel migre dans l'aliment, la concentration en sel de ses tissus s'équilibrant avec celle de la saumure.
- les deux méthodes permettent de **diminuer l'activité de l'eau du produit, et freinent ou bloquent le développement microbien**.
- Le sel agit comme **un antimicrobien**, il **neutralise les micro-organismes** responsables de la **putréfaction**.

- Le sel est utilisé à **différente dose** selon les besoins de conservation. À 2%, il **ralentira le développement de certains micro-organismes** et apportera un **goût salé**. En revanche, à **forte dose**, il **détruira la quasi-totalité des microorganismes**.
- Ce procédé est essentiellement appliqué en **fromagerie**, en **charcuterie** et pour la **conservation de certaines espèces de poissons** (harengs, saumon, ...). Il est parfois associé au fumage.
- Les denrées alimentaires conservées avec le salage comportent une **DLUO** (qui signifie *Date Limite d'Utilisation Optimale*).

B. CONFISAGE OU SUCRAGE

- Le sucrage, appelé aussi confisage, est un procédé largement utilisée en Industrie Agro-Alimentaire. Il **s'opère par l'addition de sucre, notamment le saccharose, à chaud** au produit alimentaire. **La cuisson** de la denrée alimentaire en présence du sucre s'effectue **lentement** : un sirop de sucre pénètre dans les fruits **par effet osmotique**. Grâce à son **pouvoir hygroscopique** (tendance à la fixation de plusieurs molécules d'eau), le sucre **absorbe l'eau disponible** dans l'aliment, **diminue l'activité A_w** et par conséquent **inhibe la prolifération bactérienne**.
- Le sucre, contenus dans les aliments, se **combinent aussi avec les bactéries** pour **donner des acides** (tels, le *lactique* et le *propionique*) aux **caractéristiques antibactériennes**. C'est le cas de **la choucroute, des cornichons** (fermentation lactique), le **raisin et la pomme** (fermentation alcoolique).
- Le sucre, ajouté comme ingrédient, est généralement utilisé pour **l'amélioration du goût, la couleur et/ou la texture** de certains produits alimentaires tels, **les boissons et les sauces (Ketchup)**.
- Le procédé de confisage n'est efficace qu'à de **très fortes concentrations (65-67 %)**.
- Le procédé de sucrage est utilisé pour la conservation:
 - Des sirops de glucose
 - Des conserves de fruits,
 - Des confitures et des gelées,
 - Des bonbons,
 - Des pâtes de fruits
 - Des fruits confits
- Les produits alimentaires conservés par le procédé de sucrage comportent une **DLUO**.

II. 5 AUTRES PROCÉDES DE CONSERVATION

A. FERMENTATION

- C'est **Pasteur**, en 1857 qui établira l'**origine microbienne du procédé de fermentation**. Dans ce procédé, l'aliment subit **une réaction chimique et biologique (biochimique)**, qui s'effectue entre la **matière organique qu'il contient et des micro-organismes spécifiques du milieu** (levures ou bactéries). Le processus de fermentation s'accompagne de **la formation de produits caractéristiques**, tels les **alcools, les acides ou les cétones**. Ces produits organiques permettent une **meilleure conservation de la denrée alimentaire**.
- Le procédé de fermentation est habituellement combiné à d'autres procédés, comme le salage contrôlé ou le *confisage* (*sucrage*).
- Les plus importantes transformations de denrées alimentaires par la fermentation sont au nombre de trois :
 - la fermentation alcoolique (raisin, pomme (cidre)) : Il s'agit d'un **procédé anaérobie** (*c.-à-d. en absence d'oxygène*) dans le quel les **monosaccharides sont décomposés par les levures** dans une chaîne de **réactions enzymatiques** qui s'appelle **glycolyse**. Comme produits de la glycolyse, il se forme à la fin **deux molécules d'éthanol (C_2H_5OH)**.
 - la fermentation lactique (saucisson, choucroute (chou), cornichons, fromages yaourt) : Dans la fermentation **anaérobie**, le **glucose ($C_6H_{12}O_6$)** ou le **lactose ($C_{12}H_{22}O_{11}$)** réagissent avec un **certain micro-organisme spécifique, à savoir *Lactococcus lactis*, *Lactobacillus salivarius* ssp. *Bulgarius* ou *Lactobacillus fermentum*** pour former **l'acide lactique ($OH-CH(CH_3)-COOH$)**
 - la fermentation acétique (vinaigre) : C'est un **procédé aérobie** obligatoire à **partir de l'alcool éthylique (éthanol)**. Il a lieu en présence de **la bactérie *Acetobacter aceti*** et conduit à la formation de **l'acide acétique (acide éthanoïque, CH_3COOH)**.
- Impact recherché sur le développement microbien : Tirer parti des micro-organismes présents sur ou dans l'aliment pour :
 - **améliorer la conservation** du produit,
 - **améliorer ses qualités nutritionnelles**,
 - augmenter ses **qualités organoleptiques**.

- Ces procédés de fermentation modifient le **goût de l'aliment** et **enrichissent la gamme des saveurs** mais donnent un produit qui **n'est plus identique au produit initial**.

B. MODIFICATION DE L'ATMOSPHERE

- Le principe de ce procédé de conservation est basé sur la **modification de la composition de l'atmosphère ambiante de l'aliment** (*c.-à-d. entourant l'aliment*), comme la **teneur en oxygène (O_2)**, en **azote (N_2)** ou en **dioxyde de carbone (CO_2)**. En effet :
 - Par la diminution de la **teneur en O_2** , les **réactions de maturation et d'oxydation** responsables respectivement de la **multiplication des bactéries aérobies** et des **altérations de flaveur des aliments** (rancissement des graisses) sont **ralenties**.
 - Par l'augmentation de la concentration en **CO_2 (anhydre) jusqu'à 5%, voire 10%**, l'**intensité respiratoire diminue** et produit des effets **bactériostatique et fongistatique** et même **inhibe certaines réactions enzymatiques**.
 - Par le remplacement de l'**air ou de l'oxygène avec l'azote N_2 , gaz inerte**, (*procédé dit conservation sous vide*) le **développement d'insectes** et de **moisissures toxiques** est **stoppé**, en plus de l'**inhibition des réactions d'oxydation** et de l'**effet bactériostatique**.
- Les aliments conservés sous atmosphère modifiée, sont indiqués par une étiquette portant leur **numéro E** correspondant. Les nombres E pour les gaz les plus importants sont :
 - Dioxyde de carbone : **E 290**
 - Oxygène : **E 948**
 - Azote : **E 941**
- Quelques avantages de la modification de l'atmosphère :
 - **Durée de vie allongée et meilleure qualité** : Les aliments conservés sous une atmosphère protectrice se détériorent beaucoup plus lentement. La **durée de**

conservation et la fraîcheur du produit alimentaire (préservation des propriétés nutritionnelles et organoleptiques) sont prolongées sur une **plus longue période**.

- **Moins de conservateurs** : réduire ou même arrêter complètement l'utilisation de conservateurs. Les consommateurs obtiennent des produits qui ne contiennent pas d'additifs artificiels.
- **Moins de déchets** : Une durabilité plus longue réduit en conséquence, l'élimination des déchets en raison d'aliments gâtés dans de nombreux cas.
- Ce procédé de conservation, bien que beaucoup plus efficace pour préserver la qualité des aliments, est cependant plus coûteux.
- Les produits alimentaires conservés par utilisation de ce procédé sont :
 - la viande,
 - les dérivées laitières,
 - le pain,
 - les fruits et les légumes,
 - le poisson

C. IONISATION/IRRADIATION

- **L'ionisation** et /ou **l'irradiation**, appelé encore **radio-stérilisation à froid**, sont des **procédés de conservation** récents (environs 50 ans) et relativement peu utilisés. C'est un **procédé physique** qui consiste à «**bombarder**» **l'aliment par des radiations ionisantes** créées :
 - **Par accélération d'électrons** : l'accélération d'un faisceau d'électron résulte en émission de rayonnements sous forme de photons,
 - **Par isotopes radioactifs** nommé aussi **radio-isotopes** : Ces radio-isotopes, radionucléides instables, émettent des radiations en se décomposant (le radio-isotope le plus utilisé est le *Cobalt⁶⁰* bien qu'il y a d'autres isotopes tels *Césium¹³⁷*),
 - **Par une source de rayons X** : Ces rayons d'une grande énergie (100 eV-1 MeV) émettent des radiations constitués de photons dont la longueur d'onde est comprise entre 0,001 nanomètre et 10 nanomètres (correspondant à 3×10^{16} Hz à 3×10^{20} Hz).
- **Remarques** :
 - Il est à préciser que l'irradiation consiste à soumettre les aliments à un flux de photons accélérés, alors que l'ionisation, les soumettant plutôt à des électrons.

- Les radiations ionisantes englobent les rayons : α , β , γ , X , les neutrons et les électrons accélérés.
- La dose d'irradiation est généralement mesurée en *grays*, ou *Gy*. Il s'agit d'une mesure de la quantité d'énergie transférée à l'aliment irradié. La dose d'irradiation efficace diffère d'une bactérie à l'autre et d'un aliment à l'autre, chaque microorganisme ou être vivant ayant sa propre tolérance. Le tableau 5 suivant donne les différentes **doses pour une réduction décimale des microorganismes** :

Tableau 5 : doses décimale des microorganismes

Etre vivant	Dose (krad)
<i>Pseudomonas sp.</i>	6
<i>Penicillium sp.</i>	40
<i>Salmonella sp.</i>	70
<i>Clostridium botulinum</i>	370
<i>Micrococcus radiodurans</i>	800
<i>Virus poliomyélitique</i>	1400
<i>Homo sapiens sapiens</i> *	600

* cette valeur représente la dose létale pour l'Homme

* **krad** = kiloradiation

* **1 kGy (kiloGray) = 100 000 rad (= 1 Joule/kg) = 100 krad**

- Ce **genre de procédé** permet :
 - de **réduire** ou **d'éliminer** les micro-organismes pathogènes;
 - **la réduction des pertes d'aliments** dues à l'infestation par les bactéries, les insectes et les moisissures (qui contaminent les aliments et peuvent mener à des maladies d'origine alimentaire);
 - **le ralentissement du mûrissement et de la maturation** (processus physiologiques : notamment la germination de tubercules végétaux, tels par exemple la pomme de terre) de certains fruits et légumes. Leur durée de **conservation et leur condition** s'en trouvent ainsi améliorées;
 - **la prévention efficace contre les ravages** causés par les insectes et les moisissures suivant la récolte. L'irradiation peut remplacer certains **traitements chimiques** tels que l'utilisation du *bromure de méthyle (CH₃Br)* ou le *dibromure d'éthylène (DBE)* (utilisé durant la fumaison)
- Par l'utilisation judicieuse de l'irradiation :
 - Les aliments irradiés ne **deviennent pas radioactifs** ;

- La **valeur nutritive** (vitamines, protéines,...) des aliments irradiés **demeure essentiellement inchangée**.
- L'irradiation ou l'ionisation est le plus souvent utilisée pour le **traitement des aliments solides** (viandes, la volaille, fruits de mer, épices, légumes, fruits, les herbes aromatiques), **séchés ou frais**.
- Tous **les aliments irradiés sont étiquetés**, en plus d'une description écrite, telle que « **irradié**», un **symbole distinctif**, le « **Radura** », doit figurer sur l'emballage afin d'indiquer que le produit a été irradié.

D. CONSERVATION PAR ADDITION DE PRODUITS CHIMIQUES

- Dans ce procédé, **certaines substances chimiques**, appelés aussi **additifs alimentaires**, d'origine **naturelles, animales ou synthétiques** sont additionnées à la denrée alimentaire **à petites doses**. Ce traitement est souvent appliqué afin de pallier **les changements** souvent **indésirables** causés par les procédés de conservations cités précédemment (comme par exemple : la pasteurisation, la congélation, la fermentation...).
- L'action des ces additifs chimiques sur le produit alimentaire consiste généralement dans l'amélioration:
 - **De la conservation par la réduction de la croissance microbienne** à travers l'ajout :
 - 1) **D'acides organiques ou minéraux** comme l'**acide benzoïque (E210)**, l'**acide acétique (E260)**, l'**anhydride sulfureux (E220)**, ou l'**acide lactique (E270)** :
 - 2) l'**acidification** provoque une **diminution du pH** externe qui entraîne une **baisse du pH interne des micro-organismes** et ainsi inhibe leur développement.
 - 3) **D'agents anti-oxydants** tels l'**acide L-ascorbique (E300)**, le **benzoate de sodium**, le **butyl-hydroxytoluène, BHT (E321)** ou le **butyl-hydroxyanisole, BHA (E320)** : ces **molécules empêchent l'oxydation** des nutriments (vitamines, protéines...) et donc de leur dégradation par rancissement.
 - 4) **Des gaz conditionneurs** comme par exemple le **dioxyde de carbone (E290)** et l'**azote (E941)** (qui sont les gaz les plus utilisés) : ces **gaz remplacent l'oxygène** et par conséquent **évitent l'oxydation** du produit alimentaire.

5) De l'alcool éthylique (5-50%) : cette molécule joue le rôle de désinfectant.

- Des caractéristiques organoleptiques (gout), texturales (couleur) et nutritionnels (protéines, vitamines...) par l'addition :

- 1) Des colorants comme la chlorophylle (E140) : qui donnent de la couleur aux produits alimentaires.
- 2) Des édulcorants (E9xx) ou (E4xx) comme le sorbitol (E 420), le Sucralose (E955) : par leur pouvoir sucrant rendent les aliments sucrés et adoucissent l'acidité de l'aliment,
- 3) Des exhausteurs de goût (E6xx) comme la glycine (E640): ils accroissent la saveur des denrées (c.-à-d. la perception du goût),
- 4) Des stabilisants (nommés aussi émulsifiants) (E4xx) comme la cellulose (E460) : ils prolongent la durée des couleurs, mais aussi de la structure des émulsions d'eau et de corps gras à l'intérieur des denrées, principalement en charcuterie, ou évitent que deux phases se séparent, comme dans les vinaigrettes.
- 5) Des arômes artificiels : ils parfument les denrées à la place des arômes naturels,
- 6) Des épaississants et gélifiants comme la gomme xanthane (E415) : qui renforcent la tenue d'un aliment trop liquide .

• *Tableau 6 : Exemples de concentrations admises de quelques produits de conservation :*

	<i>Anhydride sulfureux (ppm)*</i>	<i>Acide benzoïque (ppm)</i>
Produits de fruits :		
- jus de fruit	100	600
- confiture	100	
- fruits séchés	1000	
Viande, poisson, crevettes	50	5000

*(mg/Kg = ppm)

Additifs conservateurs de type acide		
<i>Code alimentaire</i>	<i>Substance</i>	<i>CJA* /Kg de poids corps</i>
<i>E200</i>	Acide sorbique	25mg
<i>E210</i>	Acide benzoïque	5mg
<i>E220</i>	Acide sulfureux	0,7mg
<i>E260</i>	Acide acétique	∞**
<i>E270</i>	Acide lactique	∞

- *Tableau 7 : Concentrations limites admissibles de quelques additifs chimiques :*

<i>Additifs conservateurs antioxydants</i>		
<i>Code alimentaire</i>	<i>Substance</i>	<i>CJA/Kg de poids corps</i>
<i>E300</i>	Acide L- ascorbique	∞

* CJA : Consommation journalière acceptable ; ** ∞ : illimitée

- *Tableau 8: Concentrations limites admissibles de quelques additifs chimiques antioxydants:*

<i>E320</i>	Butylhydroxyanisol (BHA)	0,5mg
<i>E321</i>	Butylhydroxytoluène (BHT)	0,5mg
<i>E330</i>	Acide citrique	∞
<i>E334</i>	Acide tartrique	30mg
<i>E338</i>	Acide phosphorique	70mg

CHAPITRE III

GÉNÉRALITÉS SUR LES PROCÉDÉS DE SÉPARATION

CHAPITRE III :

GENERALITES SUR LES PROCÉDES DE SEPARATION

La séparation est une **opération très importante** dans les procédés de transformation et de conservation agro-alimentaires. Dans ce chapitre, il sera question de la distinction entre **deux procédés de séparation** à savoir, la **séparation de phase** (*pressage, décantation et/ou centrifugation, filtration*) et la **séparation à l'échelle moléculaire** (*extraction par solvant, cristallisation, distillation, évaporation et filtration membranaire*).

III.1 SEPARATION DE PHASE :

- Dans la séparation de phase rentre les opérations suivantes : le **pressage**, la **décantation**, la **filtration** et la **centrifugation**. Il s'agit principalement de **séparation solide-liquide**.

A. PRESSAGE

- L'extraction par pressage est le **procédé où le liquide, qui se trouve dans les pores du produit alimentaire solide** (cellules), est **expulsé** (extrait) par **compression**, autrement dit **par application des forces de pression élevées** : une **déformation des cellules ait lieu** ; le **contenu des cellules est séparé des parois cellulaires**. Le **liquide extrait** peut-être **aqueux (eau)** ou **huileux (huile)**. Ce genre de séparation est appliqué quand une **quantité élevée de solide** et **peu de liquide** est présente dans la denrée alimentaire.
- Dans la plupart des équipements, le pressage est **réalisé** par des **forces de pression mécaniques, hydrauliques ou pneumatiques**.
 - La **presse pneumatique** comprend une membrane pneumatique gonflée située au centre de la presse.
 - La **presse hydraulique** comprend une cage servant de contenant et un plateau horizontal.
- Dans l'industrie agroalimentaire, le pressage est **utilisé** pour **l'extraction de jus de fruits** ou **de légumes**, du **sucre**, de **l'huile**, *etc...* On utilise encore le pressage pour la **déshydratation** des produits destinés à **l'alimentation du bétail**. Les **produits**

alimentaires concernés sont les graines, les fruits oléagineux tels, l'arachide, le coton, le tournesol, la palme, l'amande, etc...

- Le pressage possède l'avantage d'être un procédé plus rapide qui consomme moins d'énergie comparé aux procédés thermiques d'extraction par l'eau chaude.

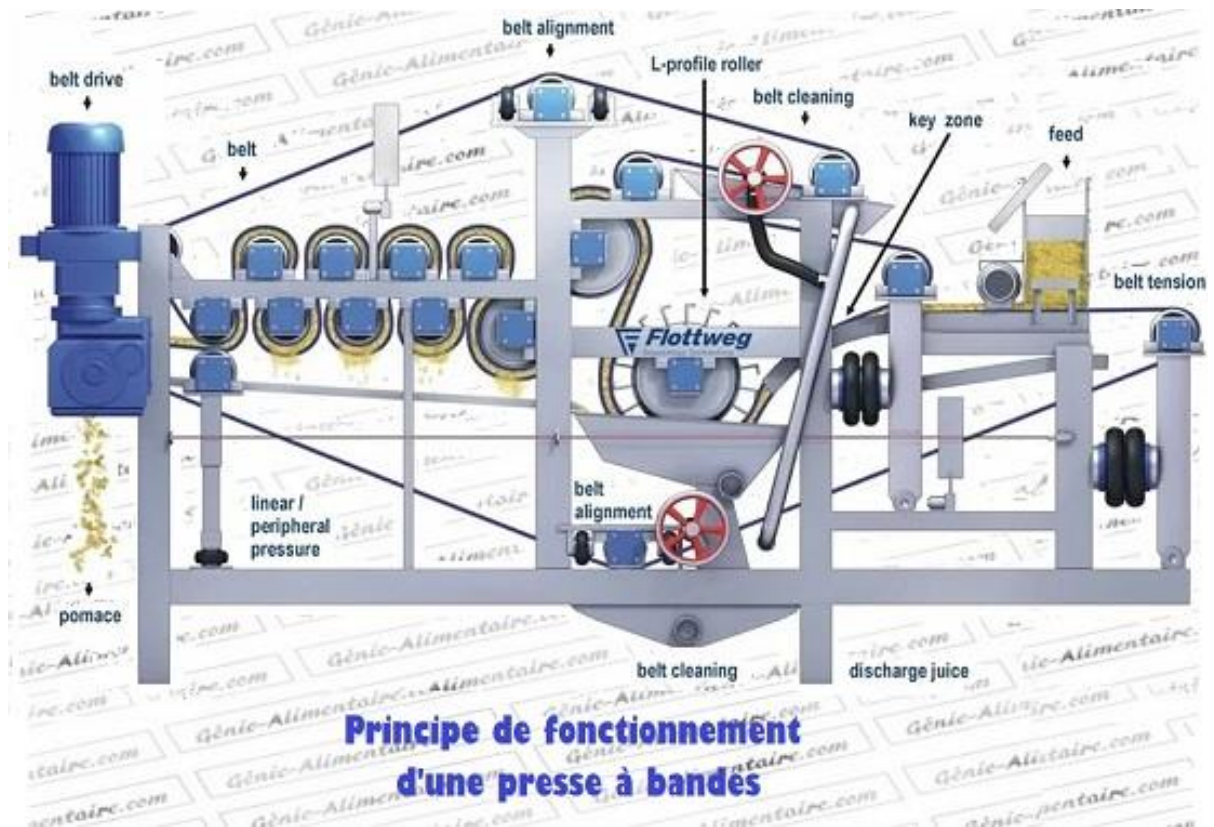
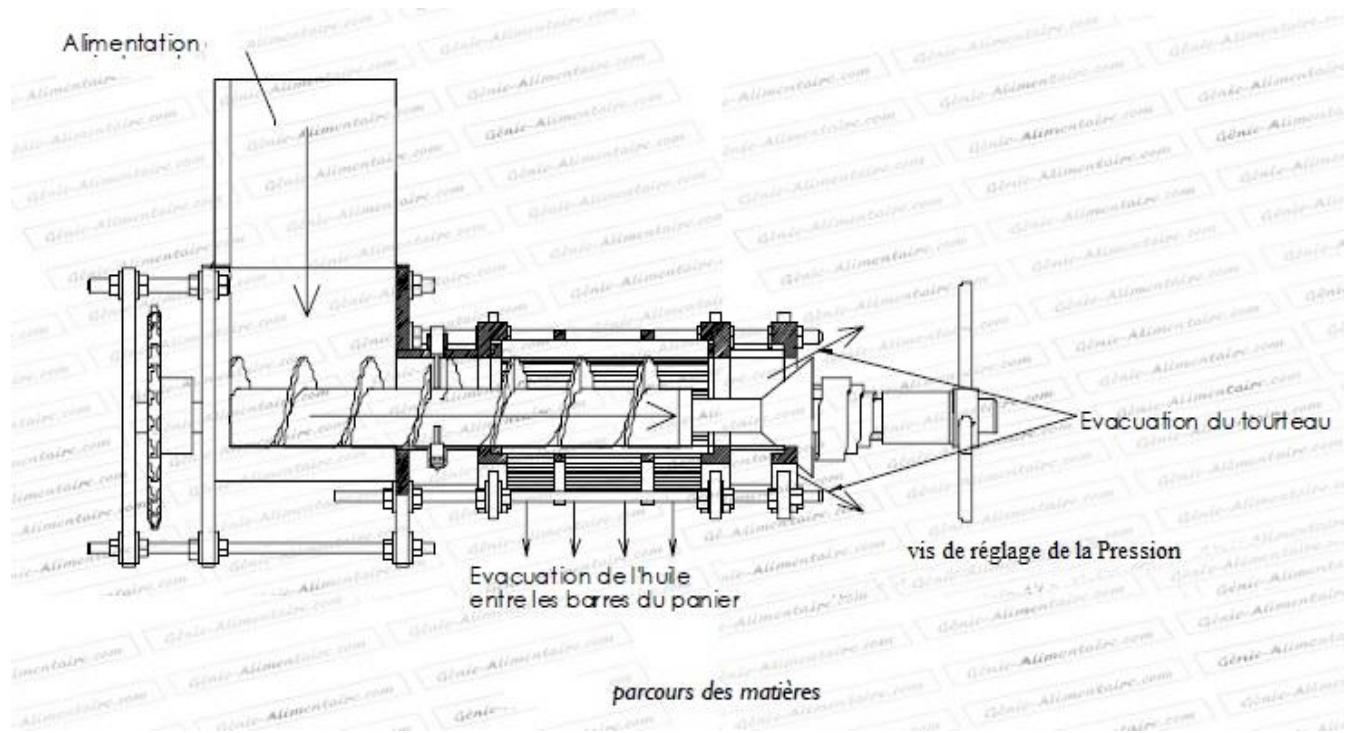


Figure 11 : Pressoir continu à bande

Légendes de la presse à bande

- **Feed** : alimentation en râpure de pommes
- **Belt** : toile ou bande
- **Discharge juice** : récupération du jus
- **Pomace** : marc de pommes (résidu)

Pressoir continu à vis
(Extraction d'huile à partir des graines oléagineuses (Colza, Palme...))



B. DECANTATION ET CENTRIFUGATION

- Ces procédés sont des **techniques de sédimentation** servant à **séparer des liquides et les liquides et solides non-miscibles** (non-mélangeables). La séparation a lieu par exploitation :

- soit **de la force centrifuge** (c.-à-d. par rotation) : **centrifugation** ;
- soit **de l'attraction exercée par la pesanteur** (c.-à-d. par gravité) : **décantation**.

Les deux opérations sont **fondées sur le transfert de quantité de mouvement** qui classe les particules dispersées dans un fluide (liquide) selon leur **masse volumique et leur taille**.

- **Description des procédés et équipements :**

a) **Décantation** :

La décantation est utilisée quand les **différences de densité sont importantes** et que le **temps ne représente pas un facteur limitatif**. Ce procédé peut se dérouler

par **charges successives** ou **en continu**. Le procédé par charges successives a lieu **dans des récipients** ou **de grand bacs (bassins)** (**Figure 12**) contenant un liquide avec, dispersées dedans, **des particules solides** de plus haute densité que lui. Au bout d'un certain temps, **ces particules plus lourdes tombent au fond du récipient**. **Le temps de décantation** peut-être **raccourci** par la **réduction de la hauteur** du décanteur et **l'agrandissement de sa surface** de son fond.

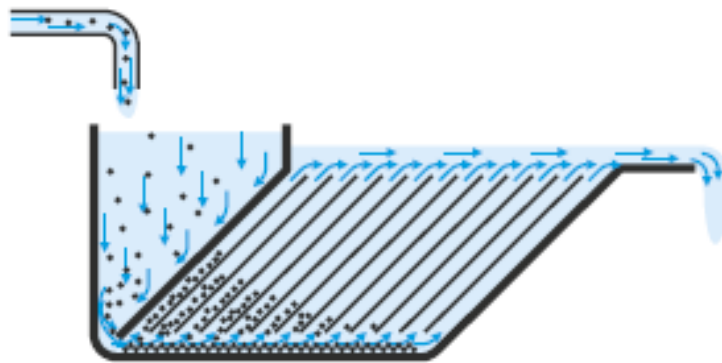


Figure 12 : Schéma d'un bassin de décantation

b) Centrifugation :

Ce procédé se déroule généralement en **continu dans des centrifugeuses** :

- **A axe vertical** : c'est un **bol à assiettes** ou à **chambre** qui **tourne sur un axe vertical** (*bol tubulaire*) (**Figure 13**),
- **A axe horizontal** : c'est un **bol cylindro-conique** qui **tourne sur un axe horizontal** et **une vis** disposée à l'intérieur du bol permettant l'évacuation des **sédiments** (**Figure 14**).

L'utilisation de la **force centrifuge accélère le procédé de séparation**. La force centrifuge nécessaire est obtenue en **faisant tourner les matières avec une vitesse de sédimentation élevée**. La force générée permet la **séparation solide-liquide rapidement** (séparation en deux phases plus ou moins riches en un constituant donné) avec **une efficacité maximale**.

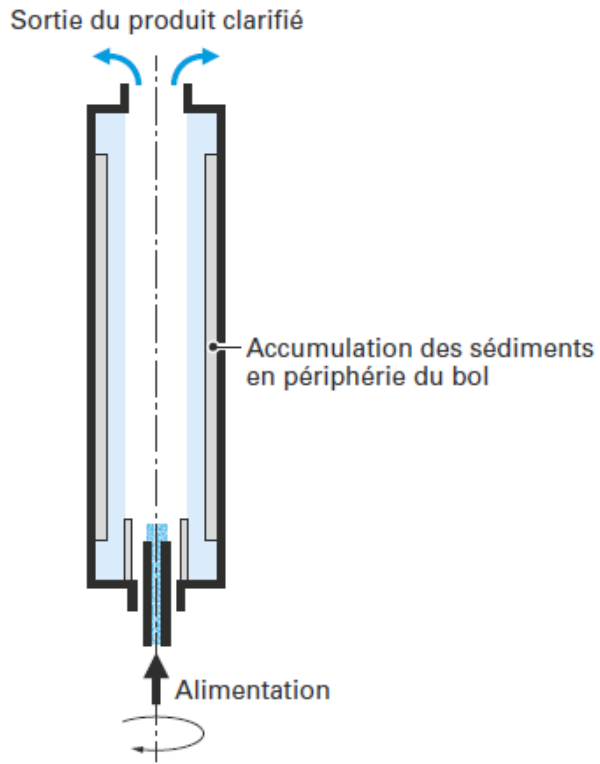


Figure 13 : Schéma d'un bol tubulaire

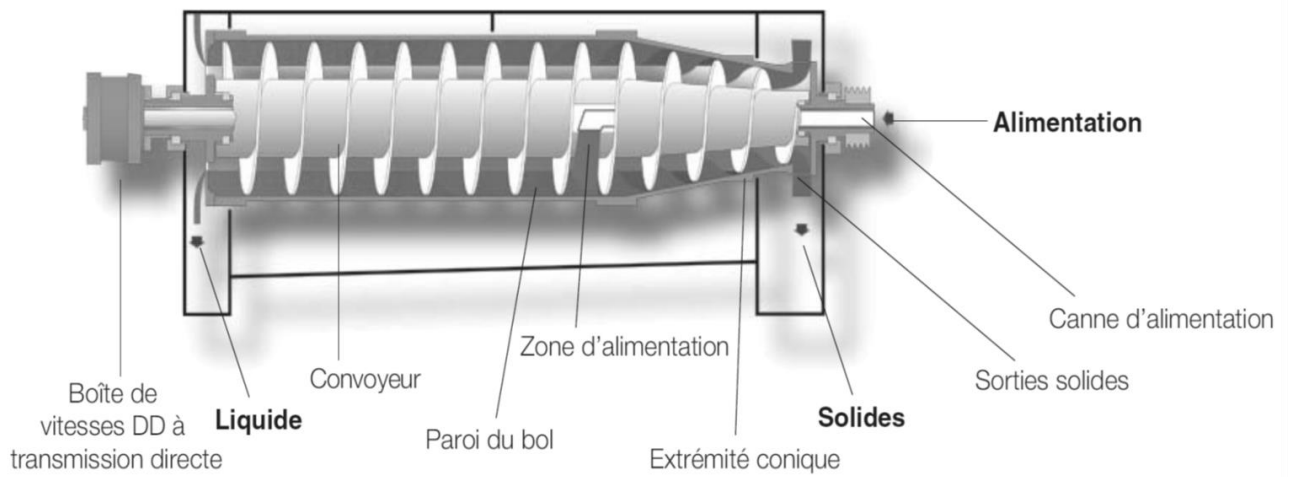


Figure 14 : Schéma d'un un bol cylindro-conique

- **Champ d'application :**

- Ces procédés sont généralement utilisées dans :
 - a) **l'industrie laitière** : pour **clarifier le lait**, **écrémer le lait** et **écumer le petit-lait**, **concentrer la crème**, **produire de la caséine** et la récupérer dans l'industrie fromagère, ainsi que dans **la transformation du lactose** et **des protéines** du petit-lait,
 - b) Elles servent aussi dans les **technologies des boissons** : **la transformation** et/ou **récupération** des **jus de légumes** et **de fruits**, du **café**, du **thé**, du **lait de soja**,
 - c) La fabrication du **beurre de cacao** et celle des **cristaux de sucre**,
 - d) **Elimination, concentration et purification d'huiles** à partir d'émulsions diverses : comme dans **l'huile d'olive** et les **huiles essentielles** par exemple.

C. FILTRATION

- La filtration est un procédé séparatif consistant à **séparer grâce à un milieu (élément) poreux** (média filtrant) les différents constituants **d'un mélange de deux phases liquide et solide**. Les particules de tailles supérieures aux pores du filtre sont retenues. Le liquide ayant traversé le filtre s'appelle **filtrat ou perméat**, et la partie solide retenue s'appelle **retentât, concentrât** ou **gâteau**.
- **Différents filtres** peuvent être employés :
 - filtre en toile,
 - filtre en cellulose,
 - filtre à sable,
 - filtre en charbon actif
- L'opération de filtration se déroule par utilisation : de **la pression**, la **force de gravité** ou le **vide**
- En fonction de la finesse de la filtration, c'est à dire de la taille des pores du milieu filtrant, la filtration va avoir différentes fonctions :
 - **Clarification** : consistant à éliminer le trouble des boissons,

- **Concentration de particules** où le gâteau récupéré correspond à la phase noble (levurerie),
 - **Purification** (stérilisation à froid) des boissons (lait micro-filtré).
- Deux techniques principales de filtration sont utilisées : la **filtration frontale** et la **filtration tangentielle** :
- La **filtration frontale** consiste à faire passer un fluide **perpendiculairement à la surface du filtre**, c'est-à-dire, par rapport au milieu poreux. Ce type de filtration est surtout employé pour filtrer des *suspensions peu chargées en particules* (Figure 15).

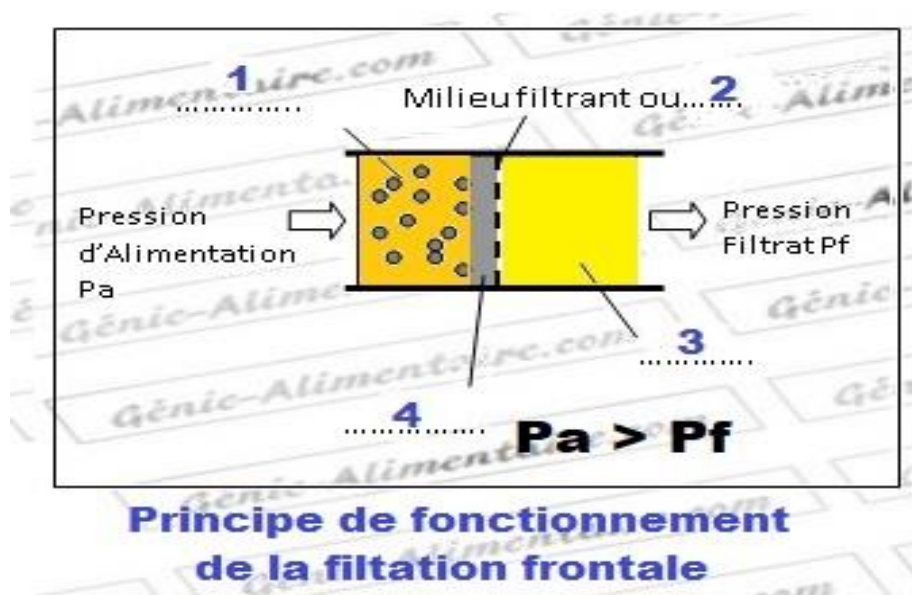
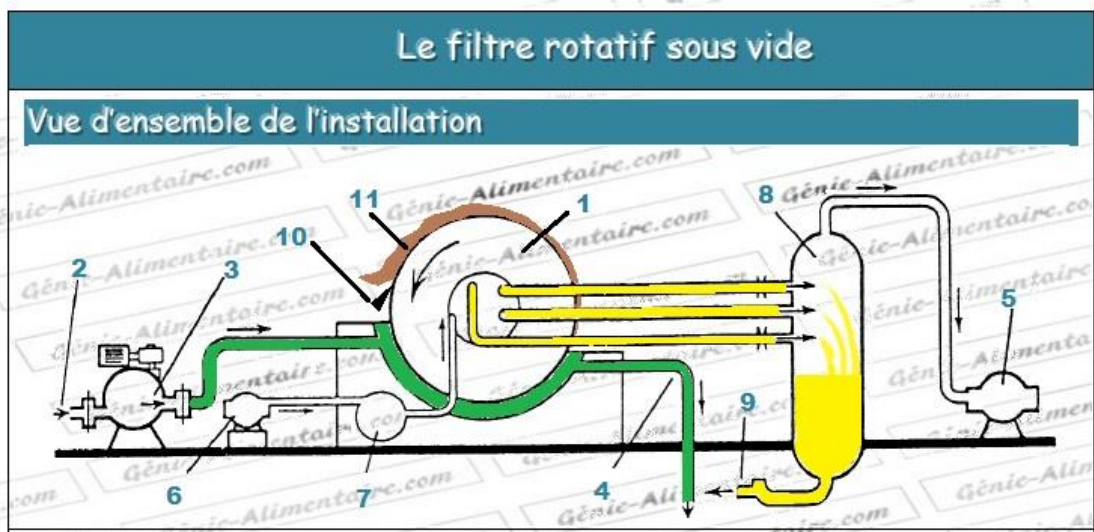


Figure 15 : Schéma de la filtration frontale

Légende :

- 1: Alimentation (liquide à filtrer)
- 2: Médium filtrant
- 3: Filtrat (liquide filtré)
- 4: Gâteau de filtration (accumulation des particules arrêtées)
- P_a : Pression de l'alimentation
- P_f : Pression du filtrat
- $P_a > P_f$: la Pression de l'alimentation est supérieure à celle du filtrat

Figure 16 : Schéma d'un filtre à tambour



Légende : 1: Tambour ; 2: Entrée de la suspension à filtrer ; 3: Pompe d'alimentation ; 4: Trop plein ; 5: Pompe à vide ; 6: Surpresseur d'air ; 7: Ballon d'air comprimé ; 8: Tank de récupération du filtrat ; 9: Sortie du filtrat ; 10: Couteau racleur ; 11: Gâteau de filtration

*Il s'agit d'un filtre rotatif **continu sous vide** très utilisé en levurerie (concentration des levures), sucrerie (récupération du sucre dans les boues de décantation) et vinification (récupération de l'alcool dans les lies). Un tambour creux sous vide et recouvert d'une toile filtrante trempe dans le liquide à filtrer. Il se dépose alors à la surface du tambour le gâteau de filtration qui sera éliminé par un couteau racleur, tandis que le filtrat qui a été aspiré à l'intérieur du tambour est stocké dans une citerne

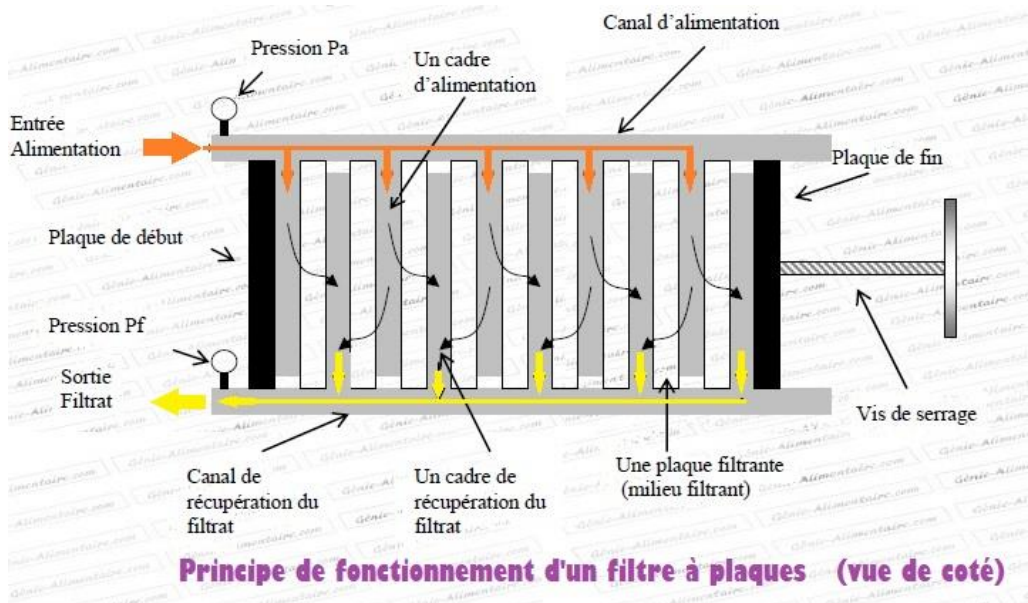


Figure 17 : Schéma d'un filtre à plaques

*Les filtres à plaques sont extrêmement répandus dans l'industrie car ils permettent d'obtenir des surfaces filtrantes énormes sous un faible encombrement.



Les différentes parties d'un filtre à plaques

- 1:** Entrée de l'alimentation (liquide à filtrer) ; **2:** Manomètre (pression de l'alimentation (Pa))
3: Manomètre (pression du filtrat (Pf)) ; **4:** Sortie du filtrat ; **5:** Vis de serrage des plateaux
6: Plateaux

- Par opposition à la **filtration frontale**, la **filtration tangentielle** consiste à faire passer **un fluide parallèlement** (tangemment) à la surface du filtre (**Figure 18**). La pression du fluide lui permet de traverser le filtre. La filtration tangentielle **plus récente** est une opération unitaire connue dans le monde entier comme étant une **étape importante** dans les lignes de process des industries agro-alimentaires. En étant beaucoup **plus sélectif** à **des températures modérées**, cette technique arrive à remplacer les technologies classiques des filtres rotatifs sous vide ou filtres à plaques. La **filtration tangentielle** s'opère en faisant passer le fluide à travers des membranes de différentes tailles de pores. Ce mode de filtration se rencontre dans les techniques séparatives membranaires. Ces procédés seront détaillés dans le cadre de la « **SEPARATION A L'ECHELLE MOLECULAIRE** ».

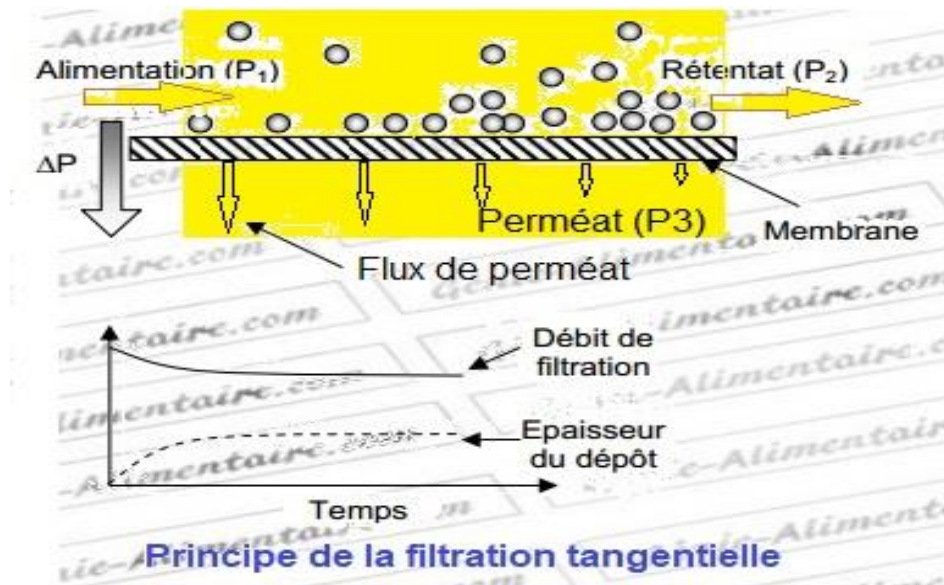


Figure 18 : Schéma d'un filtre à plaques

- **Champ d'application :**

En agroalimentaire, la filtration peut être appliquée pour **tous produits alimentaires liquides** dans le but de :

- **Clarifier** des **jus de fruits**, des **jus de canne**, des **infusions** et du **vinaigre**,
- **Concentration** de fractions du **lait** par microfiltration ou ultrafiltration (filtration poussée).
- **Filtration d'huile alimentaire et des corps gras** : pour **éliminer la couleur**, les autres **composants** et les impuretés formées lors de la désodorisation.

III.2 SEPARATION A L'ECHELLE MOLECULAIRE :

A. EXTRACTION PAR SOLVANT

- L'extraction par solvant est la **séparation d'un composé soluble (soluté)**, par **diffusion** à **partir d'un solide (phase solide : un végétal)** ou **une matrice liquide (phase liquide : une huile)** à l'aide d'un **solvant organique volatil**. Dans la première, il s'agira d'une **extraction solide/liquide**, et dans la seconde d'une **extraction liquide-liquide**.
- *Par exemple* : Dans le cas de composés extraits de matériaux solides telles les plantes, les **fragments solides sont mélangés avec du solvant** et sont **retenus** pendant un **laps de temps** prédéterminé avant **l'élimination du solvant**. Ce processus de d'extraction implique deux étapes: **(1) une étape d'initiation**; et **(2) une étape de diffusion** : Au stade d'initiation : les **fragments solides se gonflent** lorsqu'ils **absorbent le solvant** et les composants solubles sont dissous. Ensuite, **la diffusion** se produit à l'intérieur des fragments. Le **temps de rétention doit être suffisant** pour que **les solutés se dissolvent dans le solvant**.
- Un procédé *d'extraction par solvant en continu* est représenté sur la figure 19 suivant.

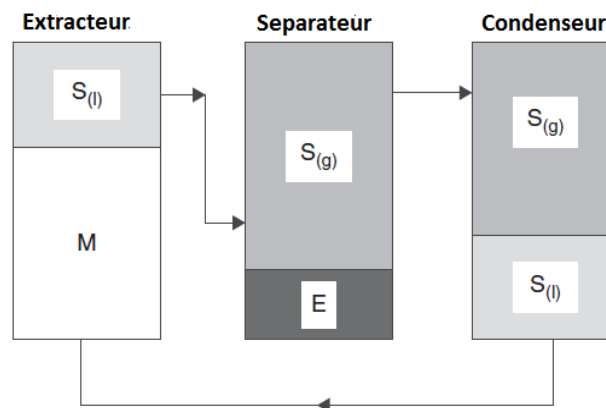


Figure 19 : Schéma d'une unité d'extraction par solvant (S = solvant ; M = matériau ; E = extrait).

* Dans ce procédé, le matériau à extraire est placé dans **un récipient d'extraction** (c'est-à-dire un **extracteur**) dans lequel le solvant est introduit à une certaine température et à un certain débit. Le solvant est ensuite passé dans un récipient (c'est-à-dire un **séparateur**) dans lequel le solvant et les composés extraits sont séparés, généralement par évaporation et enfin par distillation sous vide. La vapeur de solvant est ensuite envoyée vers un **condenseur** pour être recyclée et l'huile brute est soumise à un processus de raffinage.

- **Les facteurs majeurs** influençant l'efficacité (la qualité) de l'extraction sont :
 - **la nature du solvant utilisé** : le solvant choisi se doit doter de propriétés physiques bénéfiques telles, la grande solubilité du soluté, favorisant un taux de diffusion plus élevé ; la forte réduction de la tension superficielle à l'interface liquide-liquide ou solide-liquide.
 - **le nombre d'étapes d'extraction** : Effectivement, l'efficacité de l'extraction augmente avec le nombre d'extractions successives.
- Les solvants d'extraction couramment utilisés sont : l'**hexane**, l'**acétate d'éthyle**, le **toluène** et le **cyclohexane** (solvants immiscibles avec l'eau) ; l'**acétone**, l'**éthanol**, et le **butane** (solvant miscibles à l'eau)

a) **Méthodes d'extraction:**

Il existe deux méthodes d'extraction

- **Extraction par flux latéral ou à co-courant:** C'est la méthode d'extraction la plus simple. Il s'agit d'une **extraction répétée avec du solvant frais** (extraction à flux latéral). Cependant, ceci est rarement utilisé à cause des **coûts du solvant** et parce qu'il en résulte un **extrait à très faible concentration**.
- **Extraction à contre-courant:** C'est la méthode la plus couramment utilisée, soit en batch soit en continu. L'extraction à contre-courant n'est normalement utilisée que pour le **traitement de petites quantités de matériau**. Dans les extracteurs fonctionnant en continu, le matériau solide et le liquide (solvant) **s'écoulent à contre-courant** (en sens contraire).
- Une difficulté liée à l'extraction est la récupération du matériau extrait du solvant. Ceci peut être réalisé par **évaporation, cristallisation, distillation, stripping à la vapeur, etc.**

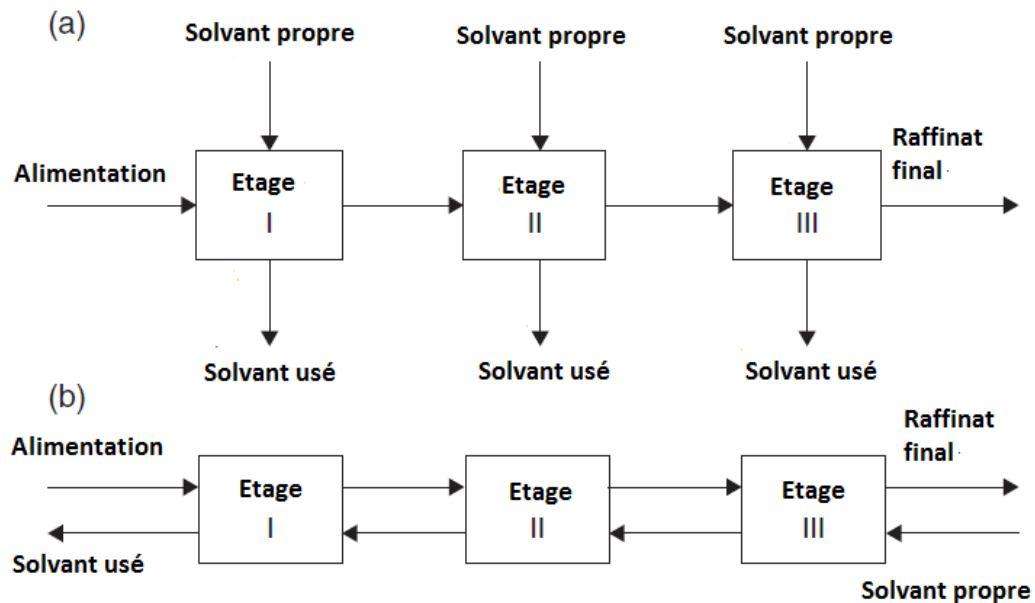


Figure 20 : Schémas d'extraction par solvant multi-étages à (a) courant-croisé et (b) à contre-courant

* En mode courant-croisé, la charge, puis le raffinat et le résidu, sont traités par étapes successives (étages successives) avec du solvant frais (propre).

* En fonctionnement à contre-courant, l'alimentation entre dans le premier étage au fur et à mesure que l'extrait final sort. Le dernier étage reçoit le solvant frais (propre) au fur et à mesure que le raffinat final sort.

b) Champs d'application :

L'extraction est appliquée à une grande variété de produits alimentaires. Des exemples typiques sont:

- **l'extraction du sucre** des betteraves à sucre ou de la canne à sucre,
- **l'extraction d'huile** de graines oléagineuses (huile de soja) et de marc vierge,
- **l'extraction d'extrait de café** et de la **caféine** à partir de **grains de café**,
- **l'extraction de divers autres composés** tels, les **protéines**, les **pectines**, les **vitamines**, les **pigments**, les **huiles essentielles**, les **composés aromatiques**, etc. à partir de nombreux matériaux divers.

B. DISTILLATION

- La distillation permet la **séparation** et la **purification des produits alimentaires volatils** à partir de **mélanges aqueux**. C'est un **procédé physique** par lequel les **composants volatils** d'un mélange sont **séparés par vaporisation partielle** en

fonction des **différences de leur volatilité** : les composés avec le **plus bas point d'ébullition** et la **pression de vapeur la plus élevée** sont **séparés les premiers**.

- La plupart des opérations de distillation industrielles se déroulent par utilisation :
 - de **colonnes de distillation** continue (**Figure 22**) : il s'agit d'une rectification (distillation répétée),
 - par distillation en mode batch (en discontinu) : c'est-à-dire par entrainement à la vapeur (**Figure 21**),
 - par distillation sous vide si les composés sont très thermosensibles (cas des huiles essentielles)
- La distillation est un procédé simple et de faible coût.

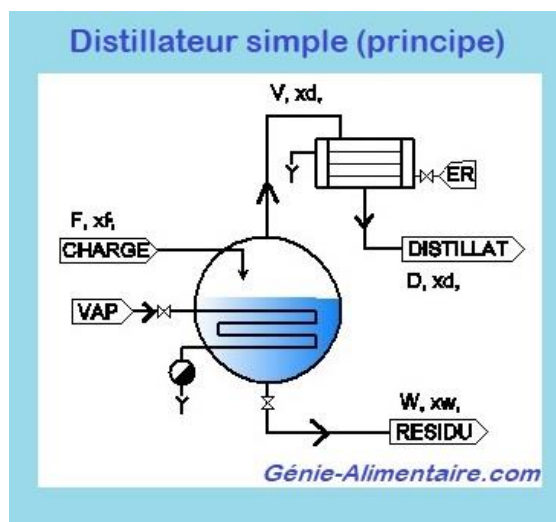


Figure 21 : Distillateur simple

Légende : **CHARGE** : Alimentation de débit (F) et de concentration en constituant le plus volatile (CPV) ou fraction molaire X_f , **VAP** : Vapeur de chauffe permettant de chauffer l'alimentation dans le bouilleur, **RESIDU** : Résidu restant dans le bouilleur après la distillation : débit W et concentration (ou fraction molaire) en CPV, X_w , V : Vapeur de concentration (ou fraction molaire) en CPV, X_d , **ER** : Eau de refroidissement u condenseur, **DISTILLAT** : Débit (D) et de concentration ou fraction molaire en CPV, X_d .

*Les vapeurs issues du mélange en ébullition sont en général condensées pour former le distillat. Le procédé peut fonctionner en continu ou en discontinu (**en batch**). Le bouilleur chauffé à la vapeur, ou avec une épingle électrique.

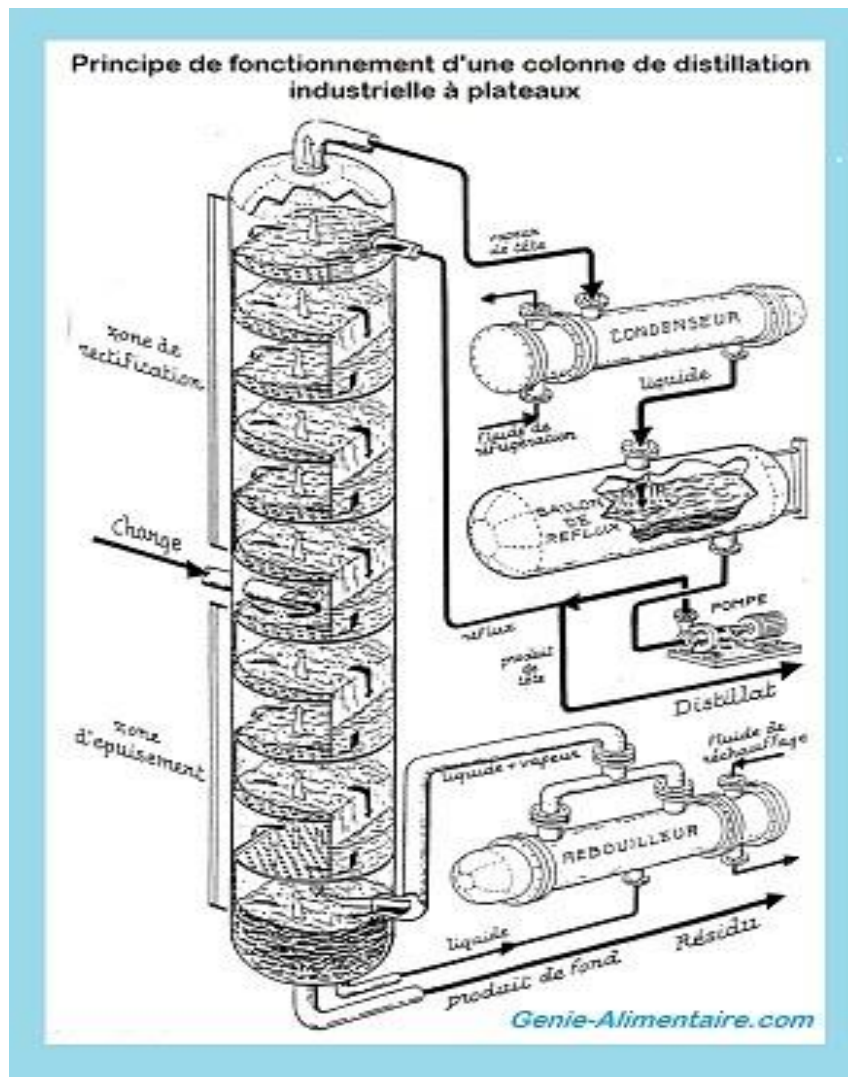


Figure 22 : Colonne industrielle

*La colonne à distiller est une colonne à plateaux, grande tour cylindrique surmontant la chaudière, dans laquelle le liquide est en ébullition. Une colonne a **une hauteur** d'environ **20 m**, et comporte une **cinquantaine de plateaux**. Un double flux de matière se produit.

- Champs d'application :

La distillation peut être utilisée pour séparer et produire :

- **des arômes volatiles**,
- des **huiles essentielles** à partir de feuilles ou de graines, *etc.*,
- **l'alcool** partir de matières premières agricoles telles, les fruits ou les céréales, par exemple.
- la **désodorisation des graisses et des huiles**.

C. EVAPORATION

- La transformation des produits alimentaires **nécessite fréquemment une étape intermédiaire de concentration** par évaporation. L'**évaporation** est principalement utilisée dans les industries agroalimentaires pour **concentrer une solution aqueuse**.
- L'**évaporation** est une **opération unitaire** appartenant à la famille des opérations de séparation : Le **solvant** est séparé **du soluté** en le faisant passer de l'état liquide à l'état vapeur. C'est **une élimination partielle du solvant** (souvent de l'eau présent initialement dans le produit) **par ébullition**. La solution concentrée (**appelée concentrât**) devient **plus stable** (*diminution de l'activité de l'eau*), **plus homogène** et **plus visqueuse**.
- L'évaporation se déroule dans des **évaporateurs (échangeurs de chaleur)** : Elle consiste à envoyer de la vapeur d'eau saturée sous vide partiel dans un faisceau tubulaire dans lequel circule le produit alimentaire. La chaleur nécessaire à la concentration du produit est transmise par condensation de la vapeur de chauffe.

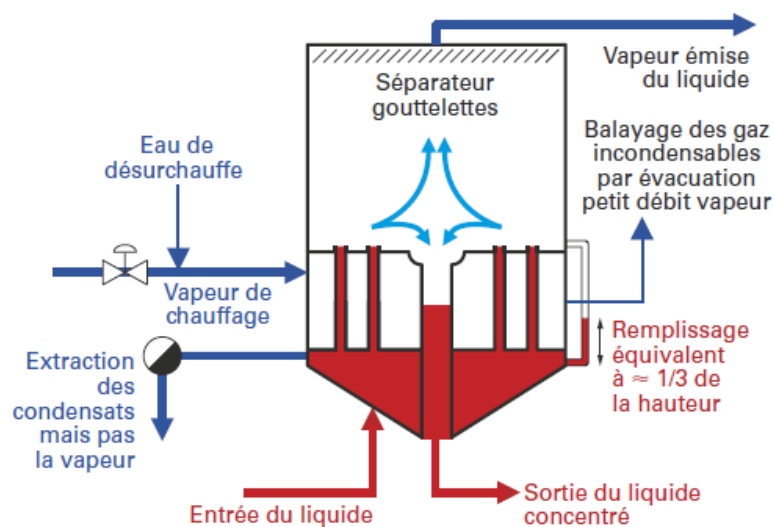


Figure 23 : Évaporateur tubulaire à grimpage

* Ce fut longtemps le type le plus classique d'évaporateurs dans l'industrie alimentaire. Il est également connu sous le nom d'**évaporateur « Robert »**. Le liquide, sous l'effet de l'échange de chaleur, bout dans les tubes avec ébullition nucléée et la formation des bulles de vapeur crée un entraînement du liquide vers le haut et donc une circulation naturelle de celui-ci.

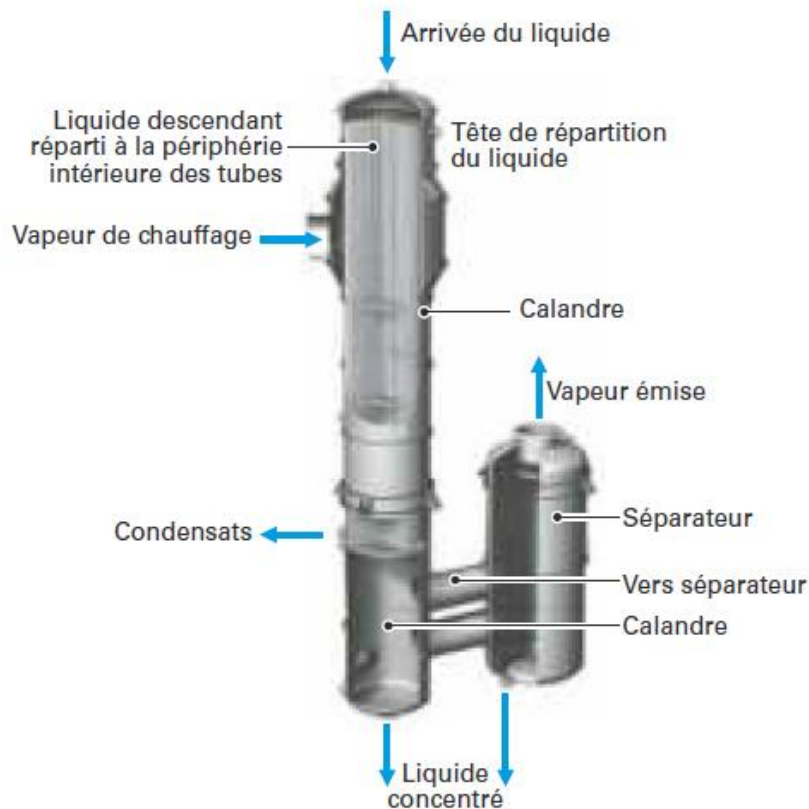


Figure 24 : Évaporateur à descentage

* Dans ce type d'évaporateur, la vapeur formée circule au centre du tube vers le bas. Elle n'a plus le rôle de transport du liquide mais favorise l'écoulement, notamment **des produits visqueux**. En comparaison avec un évaporateur à grimpage, on obtient un **film plus mince**, le **coefficient de transfert est plus important** et le **temps de séjour est plus court**.

- Le procédé d'évaporation est souvent utilisé pour concentrer des produits ou des co-produits liquides issues de l'industrie agro-alimentaire comme :
 - **Le lait,**
 - **Le sérum,**
 - **Les vinasses,**
 - **Les jus des fruits.**
- Pourquoi l'évaporation ?
 - Pour **réduire les coûts de transport** et du **stockage** en **diminuant le poids** et le **volume** (cas des jus de fruits),
 - Pour **préparer le produit à une opération unitaire ultérieure** : l'évaporation précède la cristallisation de certains produits (par exemple : saccharose) ou le séchage d'autres produits (l'atomisation du lait, la tomate, le café)

- Pour **assurer la préservation** d'un produit alimentaire en réduisant A_w (lait concentré).

D. PROCÉDES MEMBRANAIRES

- Les **procédés de séparation par membrane** forment une classe assez large de techniques s'appliquant aux **séparations liquide/liquide, gaz/liquide, solide/liquide ou encore gaz/gaz**. Cependant, les principales applications des membranes dans le domaine agroalimentaire visent des *séparations liquide/liquide* ou *solide/liquide*.
- La séparation membranaire est en réalité **une filtration moléculaire poussée**, qui s'opère à travers une membrane. La membrane est **une barrière matérielle semi-perméable (un contacteur) : film polymère, céramique** ou, rarement, **métallique**, permettant le **passage sélectif** de certains composés du fluide à traiter, sous **l'action d'une force agissante** : le plus souvent un **gradient de pression (ΔP)**, ou de **potentiel électrique (ΔE)** ou de **potentiel chimique ($\Delta \mu$)**.

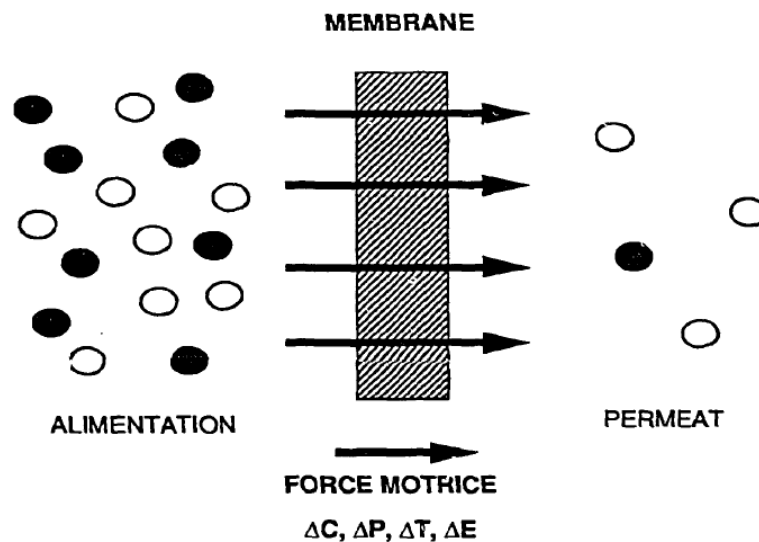


Figure 25 : Représentation schématique d'une séparation membranaire

- Champs d'application dans l'industrie agroalimentaire :

Les procédés membranaires s'utilisent :

- Fréquemment dans le **secteur laitier** pour la **concentration des protéines** du **lactosérum** et la **standardisation du lait en protéines**,
- Pour la **concentration de jus de légumes ou de fruits**
- **Dans le secteur des ovo-produits** : la concentration de l'extrait du blanc d'œufs ou du blanc et jaune d'œuf mélangés.

- Types d'opérations membranaires :

Le choix d'un type d'opération par membrane à mettre en œuvre pour la réalisation d'une séparation est en fonction des caractéristiques des molécules ou des espèces à séparer. En effet, on recense quatre opérations à membranes majeures très utilisées dans le domaine agroalimentaire, et pour lesquelles la séparation à travers la membrane est réalisée en phase liquide, sous l'action d'un gradient de pression, appelé pression transmembranaire :

- **La Microfiltration (MF):** Aire membranaire = 15 000 m²

- La microfiltration est un procédé de séparation solide-liquide. Elle permet donc la rétention des particules en suspension tangentiellement : Dans ce procédé, les solides en suspension, les bactéries et les globules gras sont normalement les seules substances interdites de passer.
- Elle est appliquée pour :

L'épuration bactérienne du lait, le fractionnement des globules gras du lait, le fractionnement de protéines et le traitement des émulsions huile/eau.

- Produits traités : **Mélanges hétérogènes** (suspension, émulsion)
- Espèces retenues : **Particules, colloïdes**
- Caractéristiques de la membrane : **Microporeuse Capillaire 100 à 10000 nm**
- **Δp : 0,2 à 2 bar**

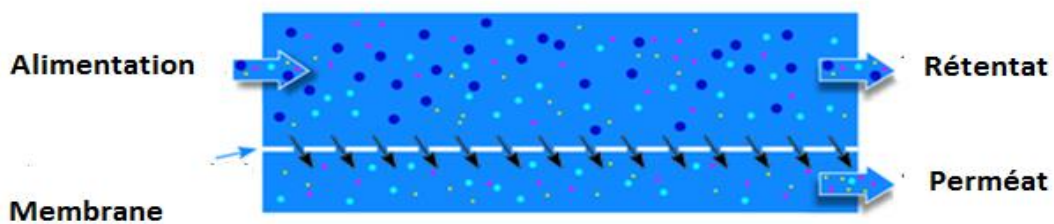


Figure 26 : Représentation schématique de la Microfiltration

- **L'Ultrafiltration (UF): Aire membranaire = 350 000 m²**

- Les membranes dans ce procédé laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (protéines, colloïdes, etc...).
- Elle est appliquée pour :

La concentration de protéines, la clarification et stabilisation de moûts et de jus et la fabrication de pré-fromage liquide.

- Produits traités : **Solutions vraies et colloïdales**
- Espèces retenues : **Macromolécules, colloïdes**
- Caractéristiques de la membrane : **Microporeuse Capillaire 1 à 100 nm**
- Δp : **2 à 10 bars**

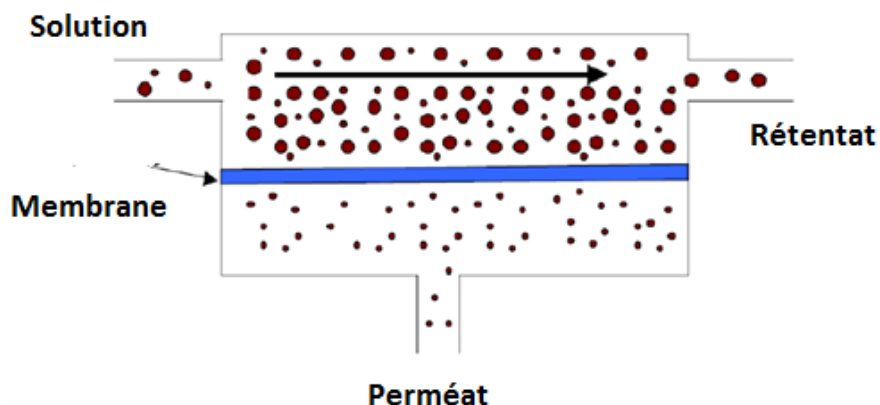


Figure 27 : Principe de l'ultrafiltration

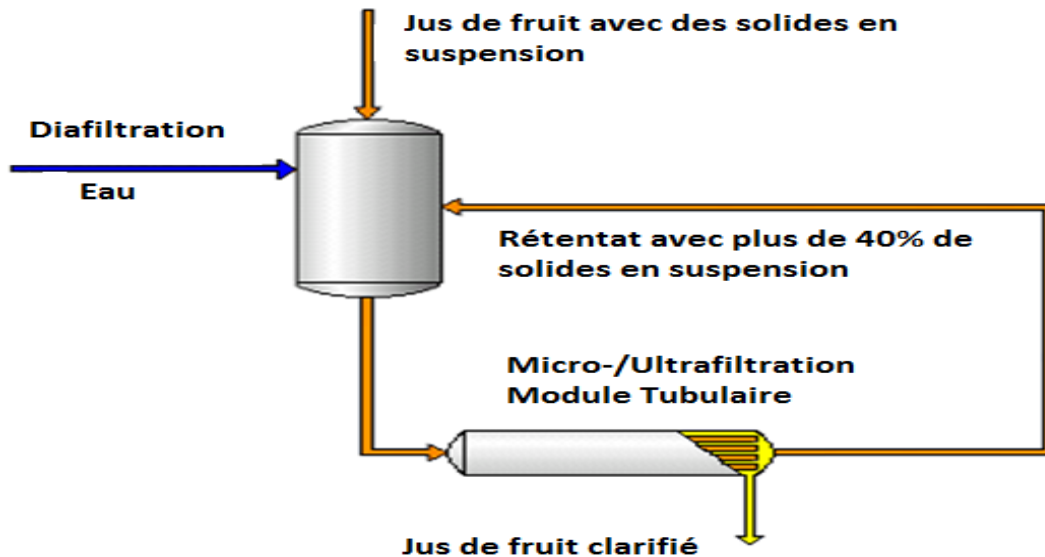


Figure 28 : Clarification du jus de fruit

- **La Nanofiltration (NF):** Aire membranaire = 100 000 m²

- Elle permet la séparation de *très petits composants* ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre (soit 10 Å) d'où son nom ; tout en excluant les ions plus gros et la plupart des composants organiques (*par exemple*, les bactéries, les spores, les graisses, les protéines, les gommes et les sucres).
- Elle est appliquée pour :

La séparation et la concentration d'antibiotiques, le fractionnement d'acides aminés et la concentration et la déminéralisation de lactosérum,

- Produits traités : **Solutions vraies et ionisées**
- Espèces retenues : **Petites molécules (M ≥ 300 g/mole) Ions**
- Caractéristiques de la membrane : **Microporeuse Solubilisation/ diffusion+ capillaire 1 à 10 nm**
- Δp : **7 à 40 bars**

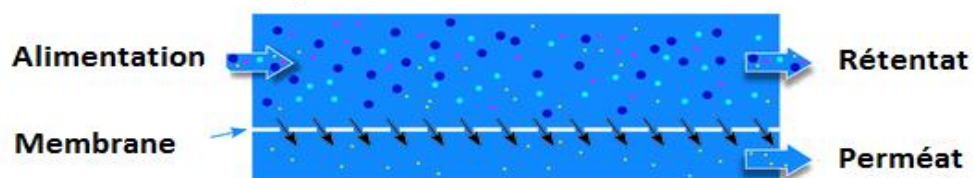


Figure 29 : Représentation schématique de la Nano-filtration

- **L'osmose inverse (OI)** : Aire membranaire = 65 000 m²

- **L'osmose** (migration de l'eau de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée afin de la diluer) est un phénomène naturel qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. La membrane ne laisse passer que **le solvant** (le **soluté** ne passe pas). La différence de concentration crée une pression appelée **pression osmotique (Po)**.
- L'application d'une pression supérieure à la pression osmotique au niveau de la solution la plus concentrée provoque une migration de l'eau de la solution la plus concentrée vers la moins concentrée, d'où le nom **d'osmose inverse**.
- Concentration de lactosérum, de blanc d'œuf, de sirop d'érable, dés-alcoolisation des vins, de la bière,
- Produits traités : **Solutions vraies**
- Espèces retenues : **Sels (NaCl par exemple)**
- Caractéristiques de la membrane : **Dense Solubilisation/ diffusion < 0,5 nm**
- **Δp : 30 à 80 bars**

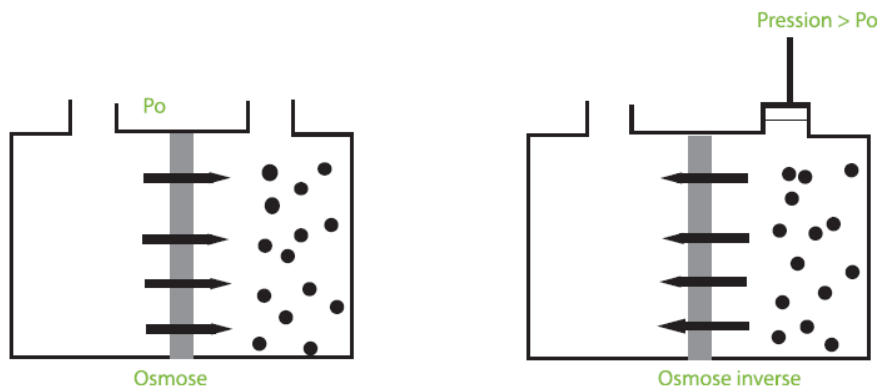


Figure 30 : Schéma du principe d'osmose et d'osmose inverse

- Les procédés de séparation membranaire présentent des **avantages clés** comparativement aux technologies conventionnelles de séparation, tels que :
 - **le traitement du produit à faible température** (faible consommation énergétique),
 - **l'absence d'adjuvant de filtration,**
 - **la bonne sélectivité.**

CHAPITRE IV

OPÉRATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET DE STRUCTURATION

CHAPITRE IV :

OPERATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET DE STRUCTURATION

IV.1 OPERATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

A. COAGULATION

- En général, la **coagulation** est un procédé dans lequel **les protides, les cristaux gras, les globules d'émulsion, etc...** deviennent **insolubles**, sous l'action de **la chaleur, des acides et des bases fortes, des métaux** ou autres **produits chimiques**.
- Dans la technologie alimentaire, la coagulation est un **changement permanent** de *protéine d'un liquide à une masse épaisse* (solide) provoquée par **la chaleur** (dénaturation), la **salinité** ou la présence **d'enzyme**.
- **Une enzyme** est une *substance organique* produite par des *cellules vivantes*. Elle agit comme *catalyseur* dans une réaction chimique et est constituée de *polypeptides*. Elle joue le rôle d'*agent coagulant*.
- La coagulation est une opération importante dans la fabrication des **laits fermentés, des fromages** et de certains **desserts lactés** (yahourt).
- Dans le procédé de préparation **du fromage**, par exemple, l'étape de base est la coagulation du lait. La coagulation se fait essentiellement par méthode enzymatique. Il s'agit de la transformation du lait liquide en **un gel** (état *semi-solide*) **de caséine** (*protéine*), appelé aussi *coagulum* ou *caillé* : le réseau protéique de caséines retient la matière grasse et la phase aqueuse (le lactosérum). La coagulation du lait correspond aussi à une étape de déstabilisation des micelles de caséines protéiques qui flocculent puis se soudent pour former un gel (*les molécules de protéines entrent en collision avec d'autres molécules de protéines et coagulent (se rejoignent)*) qui emprisonne les constituants solubles du lait.
- La coagulation du lait est réalisée par la **combinaison de l'action des enzymes protéolytiques coagulantes** (d'origine animale : constituée de *chymosine* et de *pepsine*) contenues dans la présure (c'est *la voie enzymatique*) et **des bactéries lactiques** contaminant à l'état naturel le lait ou apportées sous forme de levains (c'est

la voie fermentaire par utilisation **des enzymes microbiennes**). Les agents coagulants agissent aussi au cours de l'affinage, en influençant la *texture* et *l'aromatisation* des fromages.

- Plusieurs conditions physicochimiques impactent l'une ou les deux phases de la coagulation du lait (*phase solide : gel (caillé)* et la *phase liquide : lactosérum*), dont la *température*, la *concentration en calcium*, la *concentration en caséine*, la *concentration et l'activité de la présure*, la *force ionique* et le *pH* du lait.
- L'opération de coagulation s'effectue dans des *cuves cylindriques (Figure 31)* équipée d'une double-enveloppe chauffée à la vapeur pour le chauffage ou le maintien à température du caillé. Un *sprinkler (Système d'arrosage tournant)* distribue la présure de manière homogène dans le lait. À la fin du cycle, le caillé/lactosérum est déchargé à travers une vanne pneumatique dans le bas de la cuve, vanne qui permet également l'évacuation des solutions nettoyantes. Le *brasseur* de caillé est entraîné par un servomoteur fiable et résistant à réducteur et variateur mécaniques.



Figure 31 : Mini-cuve de coagulation

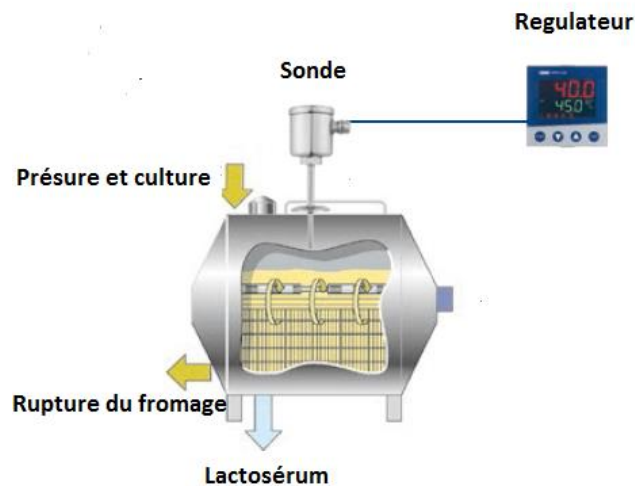


Figure 32 : Cuve de coagulation pour la préparation du fromage (ou Cuve de fromagerie)

B. GELIFICATION

- Dans l'industrie alimentaire, la **gélification** est un procédé permettant le passage d'un **liquide à l'état d'un gel** (*c.-à-d de consistance solide*) à l'aide d'un **agent gélifiant**. Cette modification est liée à l'**enferment du liquide par des protéines** pour le rendre **gélatineux** (Figure 33).

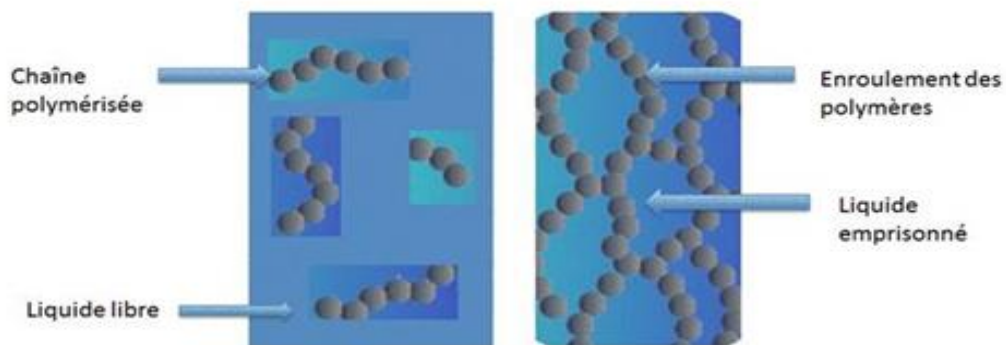


Figure 33 : Schéma du fonctionnement de la gélification

- Diverses protéines (agents gélifiants) peuvent remplir cette fonction ; elles peuvent être d'origine **animale** ou **végétale**. Elles permettent de modifier la perception d'un met en modifiant **sa texture**. On peut obtenir **plusieurs consistances de gels** en variant **la dose** du **gélifiant**. On obtient alors :
 - un **gel élastique** avec peu de gélifiant,

- à l'inverse un **gel plus dur** avec plus de gélifiant.
- **Une température exacte** de mélange est obligatoire suivant les gélifiants sélectionnés.
- Un gel est défini comme "*un système colloïdal* : les molécules gélifiantes sont des macromolécules qui forment un réseau en se solvant. Ce réseau tridimensionnel solide contient entre ses mailles une phase liquide". Les gels sont caractérisés par le fait de former une *matière visqueuse* lorsqu'ils sont *chauffés* et d'être *solides* ou de la *gelée* une fois *refroidis*.
- **Les agents gélifiants courants** utilisés proviennent de sources naturelles et comprennent *l'agar-agar, la gélatine, la carraghénine, la gomme gellane, la pectine et la méthylcellulose*. Le plus souvent, ces agents gélifiants sont présentés sous une forme solide sèche qui a besoin d'être hydratée. Tous ces éléments sont des hydro-colloïdes et réagissent lorsqu'ils sont mélangés avec des liquides. Les points de fusion et de refroidissement des agents gélifiants peuvent différer selon le type.
- La gélification est utilisée pour la préparation : *des confitures, des gelées de fruits, de desserts gélifiés*, et de *confiseries gélifiées*.

Le produit est pompé à travers le Kelstream à une capacité constante. Le Kelstream est équipé d'une double coque, dont une paroi est en contact direct avec le produit. Un agent de refroidissement est pompé à travers la double enveloppe à une température et à un volume constant, tout en restant totalement séparé du produit. Le transfert du froid se produit grâce au fluide de refroidissement qui est plus froid que le produit, qui en conséquence se refroidit et se gélifie /se solidifie. Cet échange de froid est très efficace parce que la double paroi est continuellement et complètement raclée. Les racleurs empêchent l'accumulation de produit sur la double paroi, d'où un échange de froid maximisé pendant tout le processus de production.

Figure 34 : Equipement « Kelstream » utilisé pour la gélification (Cuve de gélification)



IV.2 OPERATIONS DE STRUCTURATION

A. EMULSIFICATION

- **L'émulsification** est un procédé consistant à augmenter l'aptitude d'un liquide à former une émulsion avec un autre et donc à favoriser la stabilité de l'émulsion résultante par l'ajout d'un **agent émulsifiant** (ou **émulsionnants**).
- **L'émulsion** vient du mot latin «*emulgere*», qui signifie traire. Ce terme désigne une suspension (*dispersion liquide-liquide*) plus ou moins stables de fines gouttelettes d'un liquide (ou phase) dans un autre, les deux liquides (phases) étant peu ou non-miscibles. Le mélange obtenu est homogène et généralement d'apparence laiteuse ou trouble. On distingue donc une *phase dispersée* et une *phase continue* :
 - *l'émulsion eau dans huile* (**H/E** : il s'agit de **matière grasse dispersée dans l'eau**
Lait, crème fraîche, jaune d'oeuf) et,
 - *l'émulsion huile dans eau* (**E/H** : **c.-à-d. d'eau dispersée dans la matière grasse**
Beurre, margarine, crème glacée).
 - On parlera *d'émulsion eau dans huile* (**E/H**) si la phase continue est une phase grasse (*hydrophobe*), et *d'émulsion huile dans eau* (**H/E**) si la phase continue est constituée d'un liquide polaire (*hydrophile*) associé (d'ordinaire, il s'agit d'eau ou d'une solution aqueuse). Presque toutes les émulsions alimentaires sont de type aqueux, à l'exception notable du beurre et des margarines.
- **Les émulsifiants**, nommés quelquefois *émulsionnants*, sont fréquemment **des agents tensioactifs** qui stabilisent l'émulsion (c'est-à-dire **empêchant sa séparation**). Cependant, des **polymères synthétiques** ou des **macromolécules biologiques** peuvent aussi jouer ce rôle. Entre autres, La stabilité d'une émulsion dépend :
 - de *la taille* des gouttelettes de la phase dispersée
 - de *la différence de densité* entre les deux phases
 - de *la viscosité* de la phase continue
- **Les émulsifiants dans l'industrie agro-alimentaire** :
Dans l'industrie agro-alimentaire, les émulsifiants sont des produits chimiques utilisés pour *augmenter l'onctuosité* de certains produits, donnant la possibilité d'ainsi d'obtenir *une texture spécifique*. Les principaux émulsifiants utilisés dans l'industrie alimentaire sont :

1. La *lécithine naturelle*, surtout en **chocolaterie**,
 2. les *mono* et *di-glycérides d'acides gras* alimentaires qu'on retrouve surtout dans les **glaces** et les **brioches** industrielles : Les mono et di-glycérides d'acides gras alimentaires (*E471, E472c, etc...*) sont obtenus par *hydrolyse*, soit à partir de graisses et produits animaux (*panses de bœuf etc...*) soit à partir d'huiles végétales, comme l'huile de palme. Le produit final se présente sous la forme de cristaux liposolubles (c.-à-d. solubles dans les corps gras), de couleur blanchâtre ou jaune particulièrement clair.
- L'émulsification permet la fabrication de différents produits alimentaires tels que :
 - les **saucés** : La *vinaigrette* (**E/H** : vinaigre /huile ; instable), la *mayonnaise* (**H/E** : huile/jaune d'œuf (50% eau + lécithine émulsifiant ; stable),
 - les **crèmes**,
 - le **beurre**,
 - le **chocolat**
 - Le procédé de l'émulsification est réalisé en deux étapes successives :
 1. d'abord une étape de **dispersion-mélange**, que l'on appelle *pré-émulsification* et qui va conduire à une simple mise en suspension de gouttelettes de la phase dispersée dans la phase continue (gouttes de l'ordre de 100 µm),
 2. puis une étape dite **d'homogénéisation** dont le but est de réduire la taille des gouttes de façon à conférer à l'émulsion les propriétés requises et à la stabiliser.

Ces deux opérations s'effectuent dans des **cuves agitées** ou dans des conduites munies d'outils appelés respectivement **disperseurs** et **homogénéiseurs**.

Tableau 9 : Matériel utilisables pour l'opération d'émulsification

	PROCÉDÉ DISCONTINU (EN BATCH)	PROCÉDÉ CONTINU
PRÉPARATION DES PHASES	Cuve d'agitation	Cuve d'agitation
DISPERSION	Cuve d'agitation	Cuve d'agitation Mélangeur statique
HOMOGENÉISATION	Rotor-stator Moulin colloïdal Procédé à ultrasons	Rotor-stator Moulin colloïdal Homogénéisateur haute pression Procédé à ultrasons

Matériels utilisables pour la fabrication d'émulsion en batch ou en ligne

La figure 35 montre deux exemples d'installations en continu, l'un avec une phase de dispersion en cuve d'agitation, l'autre sans. Des systèmes de production de vide, de régulation thermostatique et de recyclage peuvent être rajoutés sur les installations.

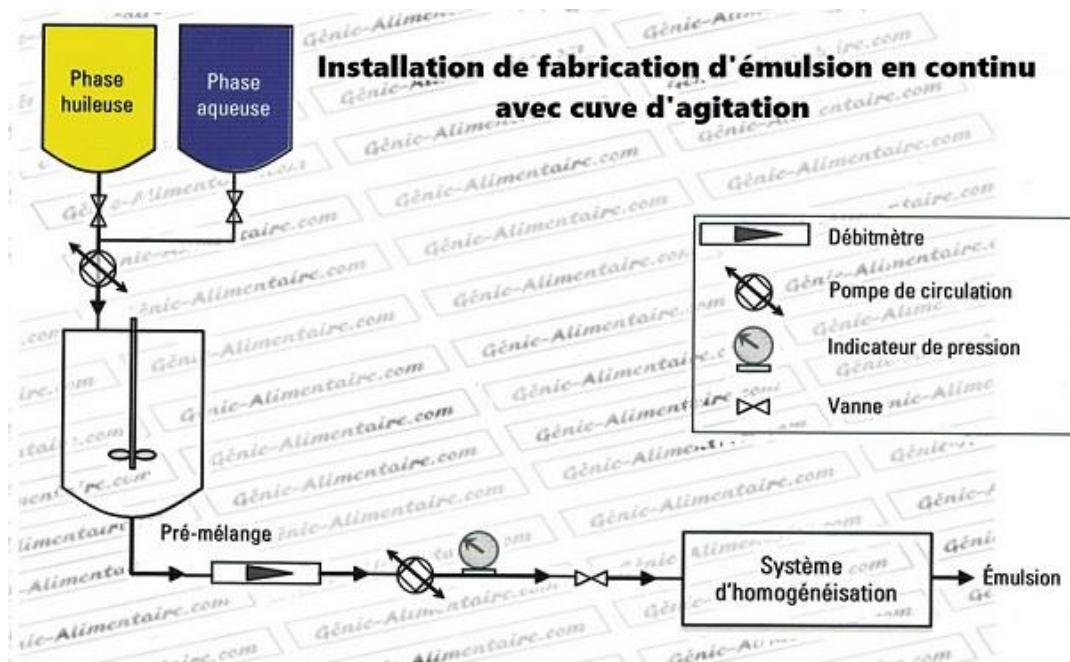


Figure 35 : Installation continue avec cuve de pré-mélange

B. CUISSON-EXTRUSION

- La **cuisson-extrusion** (technologie associant simultanément un **traitement mécanique** et un **traitement thermique**, durant un **temps très court**) est une opération **continue**, qui peut mettre en œuvre de nombreuses fonctions : *transport de matière, mélange, compression, malaxage, cisaillement, réaction chimique, chauffage, refroidissement, cuisson, mise en forme etc...*
- L'extrusion vient du mot latin « *extrudere* » qui signifie **pousser dehors**. Il s'agit d'un procédé unitaire de transformation consistant à *forcer un produit à travers un orifice de petite dimension*.
- L'**extrusion** (Procédé de grande importance dans l'industrie alimentaire) est née de *l'industrie plastique en 1935* quand ce procédé a été appliqué à l'extrusion continue des pâtes.
- **L'extrusion simple** : s'effectue généralement à une *température inférieure à 70°C* et à *forte teneur en eau*. Elle permet une simple mise en forme du produit, qui conserve

la forme de la filière comme : les pâtes alimentaires, les pâtes à gâteaux et certains biscuits.

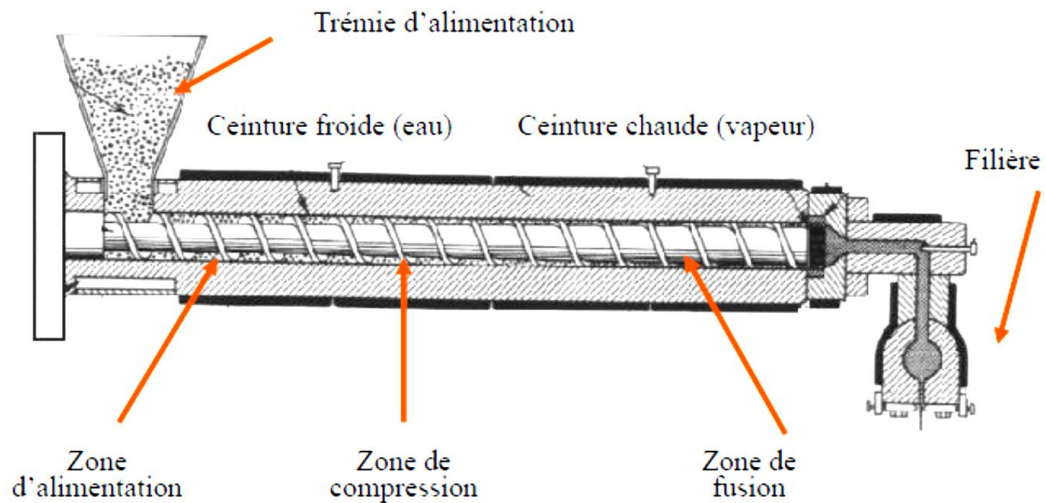


Figure 36 : Schéma d'un extrudeur mono-vis à noyau de vis croissant

- **Champ d'application :**

Les développements des applications alimentaires de la cuisson-extrusion sont nombreux et concernent presque toutes les branches telles :

- **Fabrication de caséinates,**
- **Préparation d'aliments stériles** (de type *purée de légumes*),
- **Conchage du chocolat,**
- **Décrystallisation du saccharose,**
- **Restructuration de protéines animales ou végétales,**
- **Instantanéisation** (*soupes, boissons*),
- **Hydrolyses enzymatiques** ou **acides de polysaccharides** ou de **protéines** en vue de l'obtention de *sirops de glucose, substrats de fermentation, de préparations aromatiques* ou d'*ingrédients alimentaires* à propriétés fonctionnelles modifiées.

C. FOISSONNEMENT

- **Le foisonnement** (*développé dans le courant des années 80 et 90*) est un procédé d'aération, qui consiste à **injecter de l'air filtré sous pression** dans le *mix* (le mélange). **Une mousse** est par conséquent obtenue par une *dispersion d'air* dans un *liquide visqueux*.
- Lors de l'incorporation d'air dans le mix par une agitation énergique, les protéines solubles, présentes dans le milieu, **diffusent à l'interface gaz/liquide**, se **déplissent**, se **concentrent** et **s'étalent entre l'air et la phase aqueuse**. La présence de ce film protéique **diminue la tension interfaciale** et contribue ainsi :
 - d'une part à **un accroissement de l'incorporation et de la dispersion de l'air**,
 - et d'autre part à **une stabilisation durable de la mousse** grâce à une dénaturation partielle de ces protéines au contact de l'air.
- Les protéines présentes dans le milieu sont d'excellents **agents moussants** ; c'est le cas :
 - de **la caséine bêta** (*lait et dérivés*),
 - de **la gélatine** (*peau et os des bovins*),
 - du **lysozyme** (*œufs et ovo-produits*).

À l'inverse, la matière grasse et notamment *les triglycérides riches en acides gras saturés* à moyennes et longues chaînes sont des *agents anti-moussants* qui nécessitent un renforcement de *la dose* d'agents moussants afin d'obtenir un *taux de foisonnement élevé*.

- **Le taux de foisonnement** se calcule selon le rapport suivant :

Taux de foisonnement (Φ) = volume final de l'aliment / volume initial de mix.

Autrement dit, c'est l'expansion de volume due au gaz V_G ramenée sur le volume initial de matière première V_L :

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V_L + V_G} = \frac{V_G}{V_T}$$

$$\Phi = \frac{V_G}{V_L}$$

(ε_G) : *La fraction volumique* occupée par le gaz encore appelée *taux de rétention du gaz* ou *taux de vide* ; c'est le rapport du volume occupé par le gaz V_G au volume total V_T de produit foisonné.

Les deux quantités sont donc équivalentes et sont reliées par les équations suivantes :

$$\varepsilon_G = \frac{\Phi}{1 + \Phi} \quad \text{et} \quad \Phi = \frac{\varepsilon_G}{1 - \varepsilon_G}$$

- **Caractérisation des produits foisonnés finis**

D'un point de vue macroscopique, *un produit foisonné* est principalement caractérisé par quatre paramètres physiques :

- la fraction volumique occupée par la phase gaz,
- la distribution spatiale du gaz dans le produit,
- sa texture et sa stabilité dans le temps.

- **Champ d'application :**

L'opération de foisonnement (dispersion d'un gaz dans une matrice alimentaire (la « phase continue ») permet de fabriquer divers produits foisonnés tels :

- *La crème glacée* et *les sorbets* (Φ (%) = 50% d'air en volume),
- *Biscuiterie* (fourrages ; Φ (%) = 10 - 30),
- *Blancs en neige* (Φ (%) = 400 - 600),
- *Confiserie* (marshmallow ; Φ (%) = 200 - 300),
- *Meringue* (Φ (%) = 700 - 900),
- *Mousse de fruits* (Φ (%) = 30 - 40),
- *Pâtisserie* (génoise ; Φ (%) = 20 - 40).

- **Mise en œuvre industrielle du procédé de foisonnement :**

Globalement, il existe deux types de procédés à l'échelle industrielle :

- ***Procédé discontinu de battage :***

Dans le procédé discontinu par battage, la force motrice du foisonnement est la puissance fournie par l'agitateur. Ils consistent à placer une quantité choisie de phase continue dans une cuve de volume donné, puis à la fouetter jusqu'à l'obtention du taux de foisonnement désiré, voire du taux de foisonnement maximal possible si l'agitation est poursuivie assez longtemps. Le foisonnement peut être conduit dans un récipient sous pression atmosphérique en injectant du gaz ou en l'aspirant par le ciel, ou bien à sous pression, en général avec injection.

- ***Procédés continus :***

Il existe *deux méthodes principales* permettant de réaliser l'opération unitaire de foisonnement :

1- *la première* fait appel à des *systèmes mécaniques rotatifs* qui exercent des contraintes sur les interfaces, favorisant la division des bulles par rupture. La force motrice est alors l'énergie mécanique fournie au fluide par l'agitateur, comme en discontinu, excepté que le gaz est systématiquement injecté avec la phase continue.

2- *La seconde* consiste à disperser le gaz grâce à un système de *mélangeur statique* en utilisant la dissipation énergétique engendrée par un écoulement moyen en translation pour augmenter les interfaces entre les deux phases.

- ***Dispositifs utilisés pour le foisonnement :***

L'opération de foisonnement est réalisée par utilisation des dispositifs suivant :

- les échangeurs à surface raclée (*ESR : qui sont en fait des échangeurs de chaleur*),

- le système rotor-stator à dents (*RS : qui sont des colonnes de foisonnement munies d'agitateur mécanique*) (**Figure 37**).

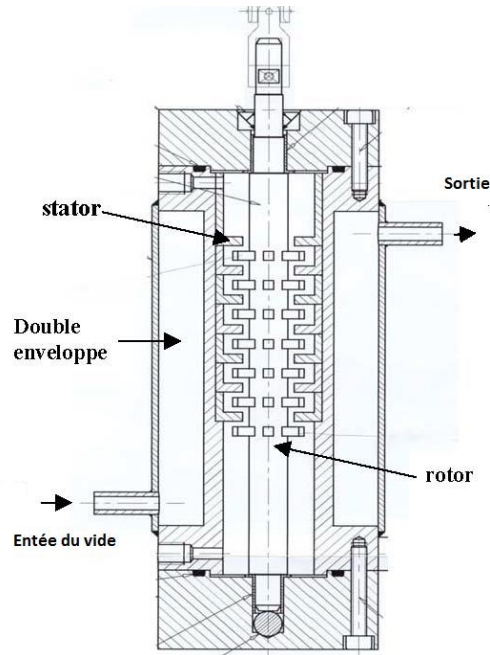


Figure 37 : Schéma de principe et coupe détaillée de l'unité rotor-stator RS



Figure 38 : Système à batteur planétaire industriel (Tonelli® T-300).

- **Avantages du foisonnement :**

Le succès de l'opération de foisonnement résulte de :

- **Sa simplicité :** car les combinaisons d'ingrédients possibles dans la phase continue sont innombrables et permettent a priori d'obtenir une infinité d'aspects et de textures, sous réserve de former des produits aérés stables.
- **Peu onéreux :** parce que l'ingrédient ajouté est le plus souvent *l'air*.
- **Diminution de la densité** de la matière première.

- *Modification de la texture, de la couleur et de la tenue en bouche.*
- *Production des aliments allégés en calorie, facilement tartinables, fondants en bouche, à l'apparence plus homogène, qui sont caractérisés par une distribution plus uniforme de la saveur.*
- *Leurs qualités sensorielles associées à un marketing fondé sur la nouveauté : ceci permet de conférer un avantage commercial indéniable par rapport aux produits conventionnels.*

CHAPITRE V

OPÉRATIONS MÉCANIQUES ET MANUFACTURIÈRES

CHAPITRE V :

OPERATIONS MECANQUES ET MANUFACTURIERES

V.1 OPERATIONS MECANQUES

A. BROYAGE

- **Le broyage** est l'une des opérations unitaires les plus courantes dans les industries agroalimentaires. C'est un procédé visant à *fragmenter un matériau* (autrement dit à *diviser un solide*) pour en *réduire la taille* afin de lui *donner une forme utilisable* ou *d'en séparer les constituants*. À cette fin, le matériau est soumis à *des sollicitations mécaniques* (*forces de contact appliquées à un à un grain du matériau*) qui créent un champ tridimensionnel *de contraintes* réparti de manière non uniforme dans le volume du matériau. Ces contraintes entraînent *des déformations*, *élastiques* et *inélastiques*, liées à la taille et/ou à la masse du grain initial.

- Origine du broyage :

Quatre types de sollicitation mécanique pouvant être à l'origine de *la comminution* de particules solides.

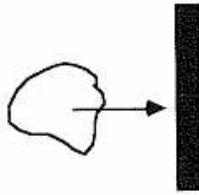
a) *Par compression* ou *compression- friction :*



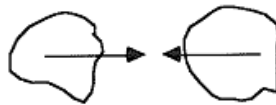
b) *Par cisaillement :*



c) *Par choc contre une paroi :*



d) *Par choc mutuel entre deux particules :*



- *La compression* ou *l'écrasement* sont généralement utilisés pour le broyage de solides durs *en gros morceaux*. *L'attrition* par frottement sur surface rugueuse donne par contre généralement *des produits fins*.
- *Le découpage* et *le cisaillement* permettent d'obtenir en général des domaines de dimension définie.
- *La réduction par impact* fournit selon le cas des tailles très différentes allant des tailles relativement *grossières aux poudres*.

Il faut noter que le broyage peut subvenir suite à des interactions avec *le fluide environnant*, ou par introduction *d'énergie électromagnétique, sonique* ou *thermique*.

- *Différents stades de broyage :*

Ils existent différentes familles de broyage qui sont les suivantes :

- *Pré-concassage* (débitage ou concassage primaire) : réduction des particules de **0 -120 mm** ou de **0 - 250 mm de diamètre**.
- *Concassage* (concassage secondaire) : délivre des particules de **0 - 40 mm** ou de **0 - 80 mm de diamètre**.
- *Concassage tertiaire* : il délivre des particules de **0 – 15 mm** ou de **0 – 25 mm de diamètre**.
- *Broyage grossier* : formation de particules de **0 – 3 mm** ou de **0 -5 mm de diamètre**.

- **Broyage fin** : produits inférieurs à **500 µm de diamètre**.
- **Broyage ultrafin** : produits inférieurs à quelques **10 µm de diamètre**.

Si on cherche le plus souvent à générer par le broyage une réduction de taille, il convient de remarquer que les opérations de broyage mises en œuvre pour arriver à cette fin provoquent par ailleurs **des modifications significatives d'autres propriétés** : *structure, forme des particules, état de surface, propriétés physico-chimiques*. Ces transformations s'expliquent par le fait que l'énergie apportée mécaniquement lors de l'opération de broyage augmente l'énergie libre du matériau broyé qui peut alors se trouver activé. Le système devient alors transitoirement instable et l'énergie peut dans ce cas se dissiper par le biais de transformations de nature physicochimiques.

- **Caractéristiques des matériaux à broyer** :

Le comportement d'un lot de particules vis-à-vis d'un processus de broyage va être étroitement lié à la nature de ces particules. Nous proposons ci-après un rapide inventaire des principales propriétés relatives à l'aptitude au broyage d'un matériau qui devront être prises en compte pour le choix d'un type de broyeur à utiliser.

Le choix d'un broyeur dépend principalement de trois facteurs :

- la nature de la matière première : est-elle abrasive, huileuse, dure, cassante, élastique, thermosensible, hygroscopique,?
- la distribution granulométrique (taille moyenne et variance) du produit que l'on cherche à obtenir.
- le dimensionnement de l'unité industrielle : quantité et/ou débit.

- **Mécanismes de fragmentation** :

Suivant le matériau traité et le mode de fragmentation mis en œuvre, différents mécanismes de fragmentation restent possibles. On considère en général trois grands types de mécanisme de fragmentation qui compte tenu de l'inhomogénéité de la répartition des défauts structuraux des particules, interviendront souvent simultanément :

- l'abrasion consiste en une érosion de la surface des particules ; elle génère deux grandes populations : la première de taille voisine de la particule abrasée, la seconde constituée par les fragments arrachés étant une population de particules beaucoup plus fines que la population de départ. L'abrasion, a donné lieu à de nombreuses études notamment de la part des spécialistes de la fluidisation et des réacteurs catalytiques,

domaine dans lesquels ce mode de fragmentation est généré par un phénomène indésirable : l'attrition. L'attrition est définie comme une usure de deux particules dures par frottement.

- la désintégration résulte d'un apport énergétique suffisamment intense pour engendrer une contrainte qui dépasse largement le point de fracture. Les particules ainsi générées sont de petite taille devant celle de la particule mère et la distribution de taille de ces fragments est très étalée.
- le clivage, phénomène intermédiaire entre l'abrasion et la désintégration, engendre la production de particules du même ordre de grandeur que la particule mère, il résulte d'un apport énergétique juste suffisant à la propagation de fractures préexistantes dans le matériau traité.

- **Technologies de broyage :**

La plupart des applications en industrie agro-alimentaires peuvent se traiter sur sept ou huit grands types de broyeurs :

- *Les broyeurs à couteaux* (parfois aussi appelés granulateurs),
- *Les broyeurs à marteaux,*
- *Les broyeurs à broches,*
- *Les broyeurs dits universels* : ils deviennent l'un ou l'autre des types ci-dessus par simple changement d'un couple rotor-stator,
- *Les broyeurs à classificateur intégré,*
- *Les broyeurs à jets* de fluide et lit fluidisé,
- *Les broyeurs à cylindres* (ou rouleaux),
- *Les broyeurs à meules.*

Le choix d'un broyeur se fait en se basant sur :

- La taille des particules désirées en sortie de l'opération,
- La dureté du matériau à broyer,
- Les contraintes spécifiques du produit traité et du secteur industriel,
- La dureté du matériau et son abrasivité.

Figure 39 : Schéma d'un broyeur à couteaux

Ils mettent en œuvre un système rotor-stator qui cisaille le produit broyé. Leur capacité de production dépend de la puissance fournie (de l'ordre de 250 à 1500 Watts), de la vitesse du rotor ainsi que de la longueur et du nombre des couteaux dont la forme peut aussi éventuellement varier. Ces appareils sont particulièrement recommandés pour le traitement des matériaux fibreux tels que les légumes, les plantes aromatiques et certaines épices mais aussi pour les matières plastiques et le papier. Les tailles obtenues sont généralement de l'ordre de 1 à 6 mm.

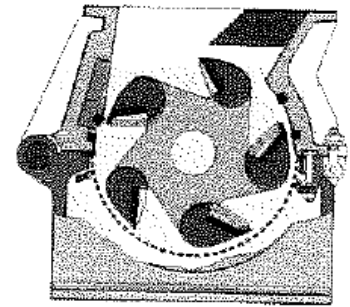


Figure 40 : Schéma d'un broyeur à marteaux

Ils produisent une réduction de taille par impact entre les particules et une surface dure. Les principaux facteurs régissant le procédé sont : la taille et la forme du tamis associé, le type de marteaux et la vitesse périphérique des marteaux (20 à 60 m/s). Ils permettent de traiter des matériaux tendres et de dureté moyenne avec des tailles de particules en sortie de 90 à 850 μm

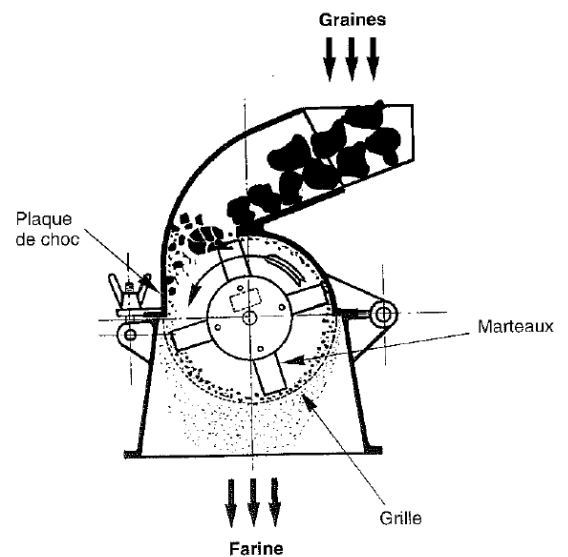
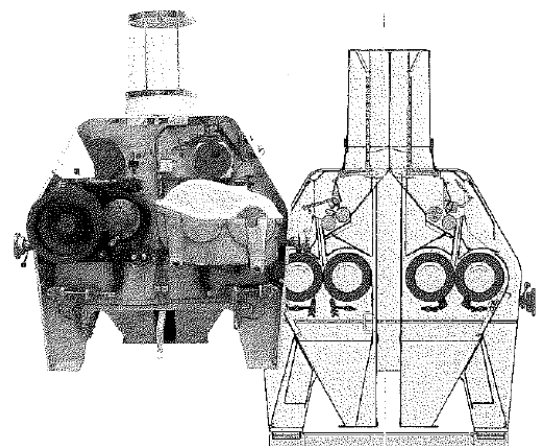


Figure 41 : Schéma d'un broyeur à cylindres

Très utilisés dans les IAA, on les trouve dans de nombreux secteurs. Ils comportent généralement plusieurs paires de cylindres. Pour chaque paire, les cylindres tournent en sens opposé et à des vitesses différentes. Lorsque les cylindres sont lisses, compression et frottements sont les moteurs de la fracture tandis qu'avec des cylindres cannelés une action de cisaillement existe également.



- **Applications du broyage aux industries agroalimentaires :**

Le broyage est utilisé dans des différentes filières de l'industrie agroalimentaire telles que :

- **Industrie des céréales :** L'objet est de séparer les parties comestibles du grain (l'amande ou albumen) de celles qui ne le sont pas (les enveloppes ligno-cellulosiques) ; **Meunerie :** broyage de blé tendre en farine ; **Semoulerie :** broyage du blé dur en semoule.
- **Féculerie :** La fécule est le nom donné à l'amidon des tubercules de pommes de terre et de manioc. Ces deux plantes voient au cours du procédé leurs tubercules subir une opération de râpage qui peut être assimilée à un broyage.
- **Industrie fromagère :** Certains fromages présentent dans leur fabrication une étape de broyage. A titre d'exemple on peut citer le laguiole, fromage bénéficiant d'une A.O.C., et produit sur le plateau de l'Aubrac. La tome fraîche égouttée subit une opération continue de broyage dans un appareil à cylindres cannelés, ce qui la réduit en " boulettes ", lesquelles sont ensuite intimement mélangées à du gros sel dans un mélangeur à cuve.
- **Industries du café et de la chicorée :** Après la torréfaction, les grains de café sont broyés par des machines à deux paires de cylindres pour atteindre la granulométrie souhaitée (environ 500 μm). Pour le café instantané, on transforme en poudre une solution obtenue par extraction à l'eau chaude du café broyé. Cette réduction en poudre peut être faite soit par atomisation soit par lyophilisation. Dans ce second cas, il faut parfois broyer entre les étapes de congélation et de sublimation. Le broyage cryogénique peut alors avoir lieu dans certains cas vers -8°C après une congélation primaire ou encore vers -40 à -45°C après une congélation secondaire. L'industrie de la chicorée se rapproche dans les procédés utilisés de celle du café.
- **Industrie du chocolat :** Le broyage intervient pour la fabrication du chocolat en poudre et des petits-déjeuners on broie des tourteaux de cacao (après dégraissage partiel) à l'aide de broyeurs du type broyeurs à broches afin d'obtenir une poudre de cacao de granulométrie voisine de celle du sucre en poudre avec laquelle on va la mélanger.
- **Industrie du sucre :** Broyage de la betterave ; Broyage de la canne à sucre
- **Industrie des épices et des condiments**

- *Industrie des corps gras*

B. TAMISAGE

- **Le tamisage** est un *procédé mécanique de séparation granulométrique* (autrement dit, *une séparation d'une population de fragments de matière suivant leur dimension*). Il est largement utilisé dans l'industrie alimentaire pour séparer les fines des particules plus grosses, ainsi que pour *éliminer les grosses particules solides des flux liquides* avant un traitement ou une élimination ultérieurs. Le tamisage est **un procédé gravitaire**.
- Un certain nombre de facteurs gouverne l'opération de tamisage tels :
 - la *taille* et le *nombre* de particules,
 - *format* de la particule,
 - *l'humidité* de surface,
 - *la densité* des particules.
- Il existe *deux types de tamisage*, le **tamisage sec** et le **tamisage humide**, qui peuvent être effectués mécaniquement ou manuellement, selon la quantité et la taille des particules à séparer. Le tamisage à sec est *la méthode recommandée* pour les granulométries comprises entre **40 µm et 125 mm**. Si le tamisage à sec ne permet pas une séparation acceptable des fractions individuelles, le tamisage humide est recommandé pour de meilleurs résultats.

- **Principe du tamisage :**

L'échantillon de matière solide sec est soumis à *des forces mécaniques de mouvement horizontal ou vertical* lors du tamisage à l'aide d'un récipient avec *une grille* ou *un fond perforé* en *acier* ou en *fer* (appelé **Tamis**) à travers lequel le matériau est secoué ou versé. Cela provoque un mouvement relatif entre les particules et le tamis ; les particules individuelles passent à travers la maille du tamis ou sont retenues sur la surface du tamis en fonction de leur taille.

- **Avantages et inconvénients du tamisage**

- a) *Avantages du tamisage :*

- Ne nécessite pas beaucoup de compétences,
- C'est une méthode très bon marché car elle ne nécessite pas l'installation d'équipements

- de pointe (le coût d'installation est très faible),
- Cela prend moins de temps comparé aux autres techniques de séparation.

b) Inconvénients du tamisage :

- L'efficacité de cette méthode dépend de différentes tailles de particules et ne peut pas être utilisée pour séparer des mélanges contenant des particules de même taille,
- Il est pratiquement impossible de mesurer des substances cohésives telles que les pulvérisations, les émulsions et les argiles.

Figure 42 : Tamis utilisés dans l'industrie alimentaire



- **Applications du procédé du tamisage :**

Le tamisage et la connaissance de la taille des particules sont primordiaux dans l'industrie alimentaire car ils affectent :

- *la production et la manipulation* des ingrédients,
- *la formulation, la transformation et le contrôle qualité* des produits alimentaires.

La taille des particules affecte *la réactivité, la solubilité et la fluidité* des ingrédients ainsi que *la texture, la sensation* en bouche et *le traitement* des produits.

L'analyse de la taille des particules est appliquée à une grande variété d'ingrédients et de produits alimentaires tels :

- *le café,*
- *le sucre,*
- *le sel,*
- *la farine,*
- *le chocolat,*
- *le lait en poudre,*
- *et les épices et les arômes.*

C. DECOUPAGE

- **Le découpage** des aliments est *une opération unitaire mécanique de réduction dimensionnelle* :
 - Qui se fait à l'aide *d'un outil tranchant,*
 - Qui permet de *diviser les matériaux solides* selon une **géométrie précise** (*contrôle de la géométrie*), afin *d'obtenir des morceaux de taille réduite* (*contrôle du produit fini*),
 - ou *de séparer des parties différentes.*
- L'opération de découpage est très fréquente sur les chaînes de production et de transformation agroalimentaires (industries de la **viande et des produits laitiers**, *par exemple*) notamment, lors de :
 - *la récolte des produits agricoles,*
 - *le parage avant transformation,*
 - ou *le portionnement des produits avant conditionnement.*

Il est à signaler qu'il existe même des branches industrielles où la fabrication du produit se résume presque à une succession d'opérations de découpage, telles que *les ateliers de découpe des abattoirs, les usines de salades 4^{ème} gamme* (c'est-à-dire les salades en sachet) ou pour *le préemballage des fromages*.

- L'opération de découpage doit répondre à trois impératifs :
 - ***Grande diversité des opérations et des formes à réaliser*** : les besoins de l'industrie alimentaire en matière de découpage sont extrêmement variés, tant au niveau des opérations à réaliser : *épluchage, parage, désossage, portionnement, etc.*, qu'au niveau de la forme et de la taille des objets à obtenir : *tranche, lanière, émincé, râpé, cube, rondelle, quartier, portion, tronçon, darne, escalope, filet, etc...*
 - ***Fabrication de portions à poids constant*** : la grande variabilité de la matière première, en particulier dans *les secteurs de la viande et du poisson*, conduit les industriels à rechercher des procédés permettant d'optimiser les trajectoires de découpe pour obtenir en final le maximum de portions à poids fixe (à quelques grammes près).
 - ***Recherche de calibres nouveaux et de formes originales*** : pour séduire les consommateurs, les innovations actuelles ne se développent pas seulement au niveau des qualités nutritives et organoleptiques des aliments mais aussi au niveau de leur taille (mini-portions, parts individuelles), et de leur forme (animaux, logos, *etc...*).
- **Techniques de découpage:**
 - La classification des techniques de découpage peut être envisagée en fonction ***des outils de découpe***, en fonction ***du mode de déplacement de l'outil coupant*** par rapport au produit (unidirectionnel : l'outil se déplace dans une seule direction, perpendiculaire au produit à trancher ; bidirectionnel : l'outil se déplace selon deux directions orthogonales ; multidirectionnel) ou en fonction ***des applications***.
 - Les techniques mises en œuvre dans les opérations de découpage des différentes denrées alimentaires sont :
 - a) ***Le découpage par lames et scies*** : les outils sont entraînés par des mouvements rapides, oscillants ou rotatifs, verticalement au sens de progression du trait de coupe de l'aliment : scie à ruban, scie circulaire.

- b) Le découpage par ultrasons :** C'est une opération qui se fait à l'aide d'un outil appelé *sonotrode*. Il permet de diviser les produits selon une géométrie précise afin d'obtenir des morceaux de taille réduite afin de répondre aux contraintes de fabrication et/ou de commercialisation. Les ultrasons ne sont pas en tant que tel l'outil de découpe, mais ils sont utilisés pour améliorer les performances d'une lame actionnée d'un mouvement de guillotine.
- c) Le découpage par jet hyperbare :** le découpage au jet d'eau hyperbare est une opération qui se fait à l'aide d'un outil : un **jet d'eau à très grande vitesse**. Il permet de diviser les matériaux solides selon une géométrie précise afin d'obtenir des morceaux de taille réduite ou de séparer les parties différentes, afin de répondre aux contraintes de fabrication et de marché. La découpe au jet d'eau hyperbare repose sur l'utilisation de la pression et du débit comme vecteur d'énergie. L'eau est projetée à très grande vitesse (600 à 1000 m/s), à des débits allant de 1 à 15 litres par minute (selon le nombre de têtes), sous forme d'un filet d'eau continu de faible diamètre (0,08 à 0,5 mm), sur l'aliment à découper.

Tableau 10 : Exemples de dimensions de découpage de quelques produits alimentaires

Produits	Dimensions
Jambons, épaules	20 dm ³
Tranches de jambon	300 cm ² × 0,3 cm
Parts de gâteaux	quelques 10 ² cm ³
Tranches de pain ou de poisson	quelques 10 cm ³
Cubes de macédoine de légumes ou de fruits	1 cm ³



Figure 43 : Trancheur - Découpeur en portions ; Découpeuse à ultrason

Le trancheur en portions constitue une excellente solution pour la découpe de longes en portions.



Figure 44 : Trancheur de blocs de fromage ; Découpeuse à ultrason

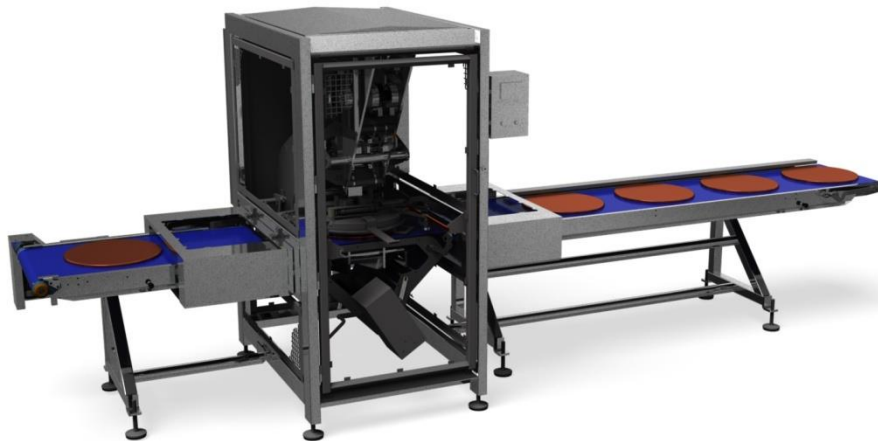


Figure 45 : Machine dédiée à effectuer des coupes de formes géométriques standards de produits frais ou surgelés. Type de machine :

- *Presses*
- *Machines à disques*

Caractéristiques techniques

- *Découpage de pâtisseries sucrées et salées, fruits et légumes,*
- *Découpage droites simples ou multiples,*
- *Machines de découpe adaptées aux produits et aux cadences.*

Mode de fonctionnement

- *Systèmes de type emporte-pièce à façon, montés en ligne ou en modules séparés.*
- *Système à lames cylindriques simples ou multiples,*

Avantages

- *Systèmes simples et faciles d'entretien et peu onéreux,*
- *Adaptés aux produits et aux procédés en amont et en aval de l'opération de découpage.*



Figure 46 : Cubeuse/ Trancheuse en continu 1, 2 ou 3D pour produits frais ou raidis (Découpe Bi-Dimensionnelle)

Domaines d'application:

- Charcuteries et Salaisons
- Fruits et Légumes
- Produits de la Mer
- Produits Laitiers

V.2 OPERATIONS MANUFACTURIERES

A. EMBALLAGE ET CONDITIONNEMENT

Tout au long de la filière, au cours des étapes de transport, de stockage et de commercialisation, les aliments sont le plus souvent protégés par un conditionnement qui les met à l'abri des chocs mécaniques, de la contamination microbienne ambiante, parfois de l'air, de la chaleur et de la lumière *etc...*

- **L'emballage** correspond à tout produit constitué *de matériaux* de toute nature, destiné *à contenir* et *à protéger des marchandises données*, allant des matières premières aux produits finis, *à permettre* leur manutention et leur acheminement du producteur au consommateur ou à l'utilisateur, et à assurer leur présentation. **Conditionner** un produit alimentaire consiste *à prélever* une certaine quantité de ce produit et *à la loger* dans *une enceinte* qui sera *close* après remplissage.
- L'emballage donne une présentation valorisante. les rôles de l'emballage sont :
 - 1) *Maintiens des éléments de l'aliment entre eux,*
 - 2) *Protection, suivant le cas, contre :*
 - L'air, l'humidité
 - Les gaz
 - Les solvants
 - Les micro-organismes

- Les insectes et les rongeurs
- La lumière (y compris les ultra-violets)
- Les chocs, l'écrasement...
- La dégradation du produit (rancissement, oxydation, effritement, autolyse)

3) *Mise en valeur du produit :*

- Visibilité,
 - Esthétique,
 - Information (étiquetage, mode d'emploi, qualité...),
 - Publicité sur le lieu de vente.
- Les denrées alimentaires sont caractérisées par *des critères physiques, chimiques et biologiques* qui justifieront des traitements spécifiques lors de leur conditionnement et feront appel à des emballages bien adaptés à ces traitements. On envisagera leur conditionnement en fonction des critères suivants :
 - *plats* ou *gazeux* ;
 - *appartenance*, ou non, au domaine de la bactériologie acide ;
 - A_w des contaminants potentiels ;
 - présentant, ou non, *une sensibilité à l'oxydation* ;
 - *tolérant*, ou non, un *traitement thermique de stabilisation* ;
 - possédant dans leur *composition des éléments chimiques particuliers* susceptibles d'évoluer après leur conditionnement.
 - Les emballages sont classés en trois catégories:
 - *Emballage primaire* : directement en contact avec le produit, avec par conséquent des exigences relatives notamment à son innocuité en termes de réaction chimique entre contenu et contenant ou de migrations de composés du contenant dans le contenu ;
 - *Emballage secondaire* : qui peut regrouper plusieurs unités, appelé encore « unité de vente consommateur » ;
 - *Emballage tertiaire* : qui regroupe plusieurs unités de vente au sein d'un carton ou d'une palette, et qui sert au transport des marchandises. On parle également d'« unité logistique ». Compte tenu de ses propriétés, le verre est un matériau qui est exclusivement réservé à la fabrication d'emballages de type primaire.

Les emballages primaires et secondaires doivent permettre, en plus de leur rôle protecteur, d'identifier le produit et de renseigner le consommateur sur le volume ou le poids de liquide

contenu, l'identité du fabricant et/ou du pré-emballer, d'apporter des précisions sur **la date limite de vente (DLV)**, **d'utilisation optimum (DLUO)** ou de **consommation (DLC)** du produit lui-même, ou encore renseigner sur **sa composition**, **sa valeur énergétique**, **sa teneur en alcool** et, éventuellement, **les additifs de stabilisation** utilisés. Ces renseignements, dont certains sont obligatoires et précisés par le législateur, seront mentionnés par étiquetage ou, à la limite, imprimés directement sur l'emballage ou sur son système d'obturation.

- **Le conditionnement** des denrées alimentaires met en œuvre trois éléments :
 - **un emballage : contenant ;**
 - **une denrée alimentaire : contenu ;**
 - **une technologie**, qui s'appuie sur des machines et qui peut être : *conventionnelle* (atmosphérique), *sous dépression* (vide), *sous surpression* (remplissage iso-barométrique pour les boissons gazeuses), sous *atmosphère modifiée* (remplacement de l'air par un gaz ou un mélange gazeux), ou encore *aseptique*.

- Les matériaux utilisés pour l'emballage des aliments sont extrêmement divers. Ils sont choisis en fonction du problème à résoudre, de l'aliment lui-même, et des contraintes locales. Les matériaux d'emballage les plus fréquemment utilisés dans l'industrie alimentaire sont :
 - **les plastiques (flexibles ou rigides),**
 - **les papiers,**
 - **les cartons,**
 - **le verre et**
 - **les métaux.**

- **Principales opérations de conditionnement :**

Le *lavage*, le *rinçage*, le *soutirage* et le *bouchage* des bouteilles, ainsi que le *sertissage* des boîtes boisson, sont **les principales opérations** réalisées dans un atelier de conditionnement de denrées alimentaires.

 - **L'opération de lavage** met en œuvre des machines importantes dans lesquelles les récipients subissent des trempages et des injections successives de solutions détergentes et d'eau.
 - Pour **le rinçage**, des solutions antiseptiques sont injectées en plus de l'eau et suivies d'un égouttage.

- **Le soutirage** met en œuvre deux modes de remplissage : **le remplissage** à niveau qui implique un contact étroit entre le récipient et l'organe de remplissage, et le remplissage à jet libre limité dans ses applications aux liquides plats.
- Quand **au bouchage** des bouteilles, il met en œuvre différents procédés qui exigent un profil spécifique de bagues des récipients.
- **Le sertissage** des boîtes boisson est une opération délicate qui implique souvent une conception de la soutireuse différente de celle utilisée pour les bouteilles. Ces opérations sont les seules avec la pasteurisation à associer des principes mécaniques et hydrauliques à des impératifs biologiques.
- **Machines d'emballage et conditionnement :**

La machine de pesée et d'emballage combinée standard convient aux bonbons de pesée, aux graines, à la gelée, à la nourriture pour animaux de compagnie, à la nourriture gonflée, aux pistaches, aux cacahuètes, aux noix, aux raisins secs, aux fruits secs, aux aliments surgelés, à la collation, aux boulettes de viande, etc. La machine de pesée et d'emballage combinée mini convient à la pesée de petites particules telles que des graines, du thé et des grains de café.



Figure 47 : Machine de pesée et d'emballage

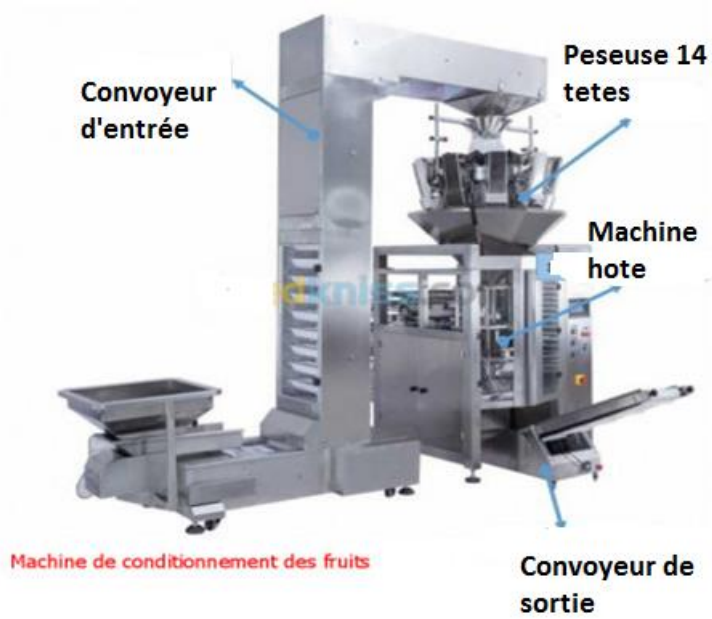
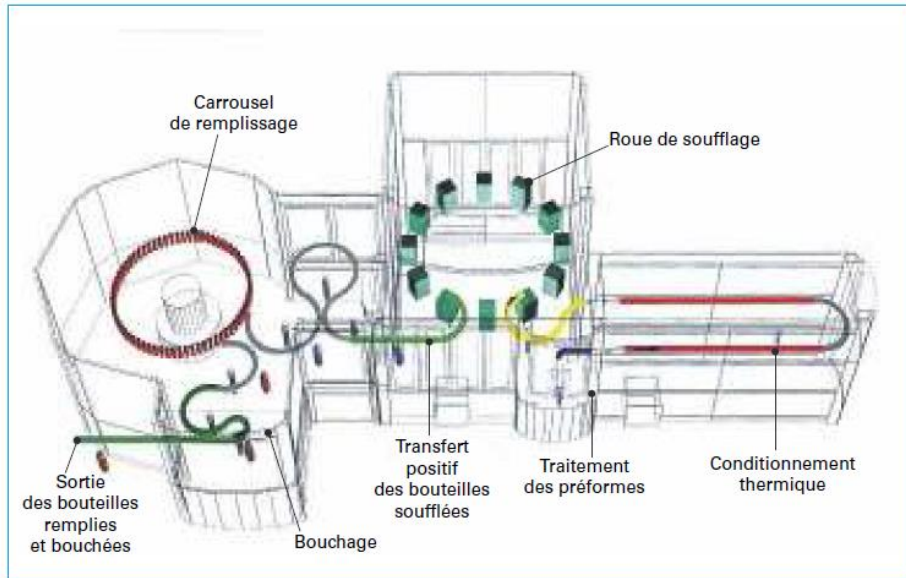


Figure 48 : Machine De Conditionnement Des Fruits

Machine de conditionnement de poudre



Figure 49 : Machine de conditionnement de poudre

Cet emballage permet d'appliquer et de souder du film thermoscellable. Le mot anglais désigne à la fois la technique (application de sac thermo-soudé de manière horizontale) et la machine elle-même. Cette technique simple et économique (la machine enveloppe le produit et le soude sur les côtés) est la plus connue dans le monde alimentaire mais aussi de l'édition de brochures et revues.

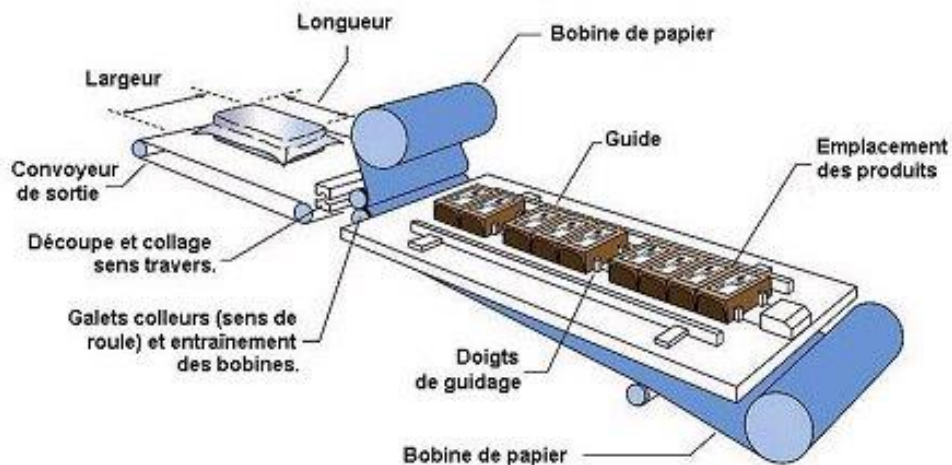


Figure 50 : Schéma représentatif d'emballage avec la technique FLOWPACK

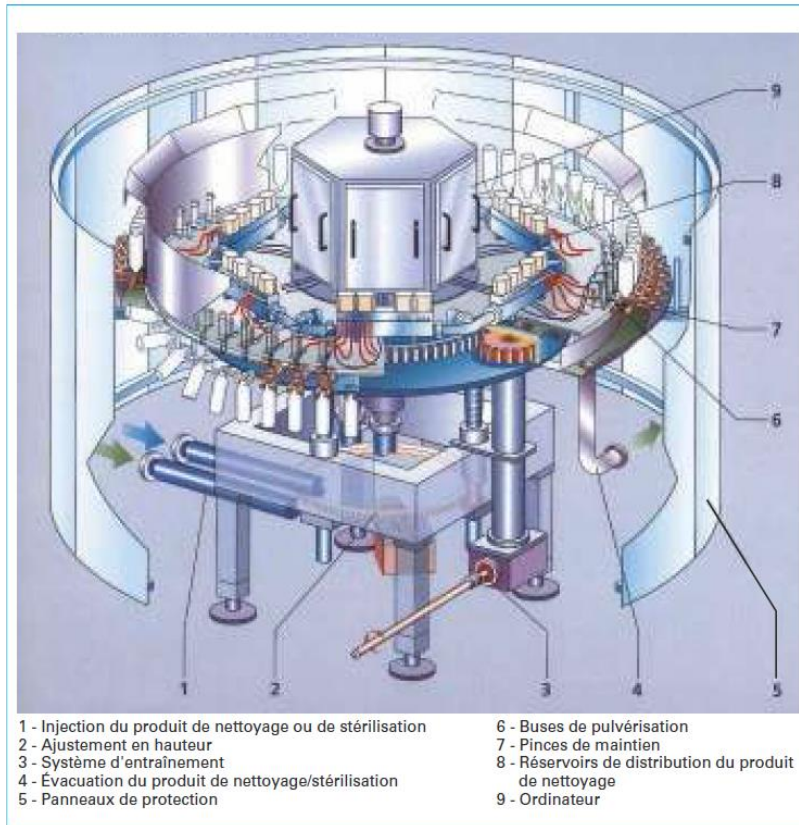


Figure 51 : Automates de rinçage et nettoyage de bouteilles

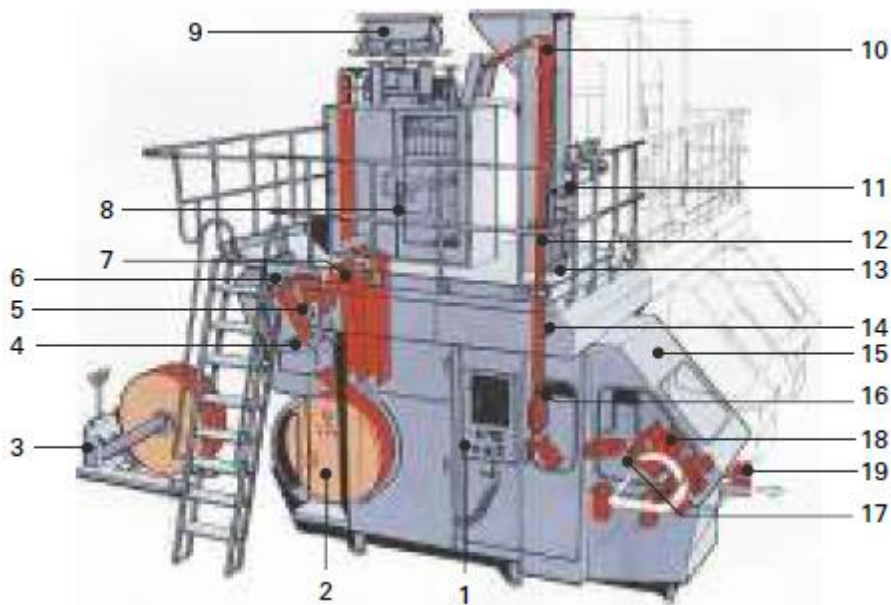


Figure 52 : Vue d'ensemble de la conditionneuse

- 1 – Panneau de commande
- 2 – Rouleau de matériau
- 3 – Équipement manuel de raccordement du matériau d’emballage
- 4 – Chariot pour le transport du matériau d’emballage
- 5 – Mécanisme dateur
- 6 – Roue de plissage
- 7 – Boucle de transfert régulier
- 8 – Cabine de contrôle électronique
- 9 – Applicateur du film de liaison pour raccordement de soudure longitudinal
- 10 – Début de formation du tube
- 11 – Tube de remplissage
- 12 – Soudage longitudinal par recouvrement
- 13 – Plate-forme
- 14 – Photocellules de commande de positionnement du décor
- 15 – Carter contenant le système NEP de la machine
- 16 – Réalisation de la soudure transversale de fermeture par pression hydraulique
- 17 – Convoyeur pour transporter les emballages depuis les mâchoires jusqu’à l’unité finale de pliage
- 18 – Unité finale de pliage qui plie et soude les cornes de l’emballage
- 19 – Évacuation des récipients pleins

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Robert NOUT, Joseph D. HOUNHOUGAN, Tiny van BOEKEL, **LES ALIMENTS, Transformation, Conservation et Qualité, Editeur** : Backhuys Publishers, Leiden, the Netherlands, **2003** (Printed in Germany).
- [2] Laurent BAZINET, François CASTAIGNE, **Concepts de génie alimentaire : Procédés associés et applications à la conservation des aliments**, Edition, Tec & Doc, Lavoisier, France, **2011**.
- [3] Jean-Jacques BIMBENET, Albert DUQUENOY, Gilles TRYSTRAM, **Génie des procédés alimentaires : Des bases aux applications, Editeur** : DUNOD, Paris, **2007**.
- [4] R. JEANTET, G. BRULE, G. DELAPLACE, **Génie des procédés appliqués à l'industrie laitière**, 2ème Edition, Tec & Doc, Lavoisier, France, **2011**.
- [5] P. MAFART, E. BELIARD, **Génie industriel alimentaire. Tome 2 : techniques séparatives**, 2ème Edition, Tec & Doc, Lavoisier, France, **2004**.
- [6] P. MAFART, E. BELIARD, **Génie industriel alimentaire. Tome 1 : Génie procédés physiques de conservation**, 2ème Edition, Tec & Doc, Lavoisier, France, **1997**.
- [7] TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, GÉNIE INDUSTRIEL, **Emballage des produits alimentaires et autres conditionnements spécifiques**, Réf. Internet : 42132 | 4e édition, Ti088 – Emballages, www.techniques-ingenieur.fr.
- [8] TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, GÉNIE INDUSTRIEL, **Génie industriel alimentaire**, Réf. Internet : 42469, Ti700 – Agroalimentaire, www.techniques-ingenieur.fr.
- [9] Zeki BERK, **Food Process Engineering and Technology**, Second Edition, Academic Press is an imprint of Elsevier, London NW1 7BY, UK, **2013**.
- [10] Marie DEBACQ, **Séparations mécaniques fluide/solide**, Licence. CGP109 "Génie des procédés : Opérations unitaires fondamentales", Cnam Paris, France, **2019**.

QUESTIONS DE COURS EXTRAITS DES SUJETS D'EXAMEN :

Examen final – Procédés Agro-alimentaires/2018-2019 :

- 1- Le procédé de lyophilisation utilise-t-il des transformations chimiques ou des changements d'état ? Expliquer
- 2- Pourquoi la congélation favorise-t-elle la conservation des aliments ?
- 3- Qu'arrive-t-il aux bactéries lorsqu'elles sont refroidies à - 18°C ?
- 4- Donner le nom des deux principaux procédés de conservation par soustraction de la chaleur. Quel est leur principe commun ?
- 5- Quels sont les besoins d'une bactérie pour se multiplier ?
- 6- Expliquer la fermentation du lait. Quel est son but ?
- 7- Quel mode de conservation a été inventé par Nicolas Appert à la fin du XVIIIème siècle ? Décrire son principe.
- 8- Quel est l'avantage de la surgélation comparée à la congélation ?

Examen de Rattrapage – Procédés Agro-alimentaires/ 2021 :

Question N°1 : Les denrées alimentaires peuvent subir des réactions de dégradation diverses durant toutes les étapes impliquées dans leur production à partir du champ jusqu'au consommateur. Quelle est l'origine de ces dégradations. Expliquer brièvement.

Question N°2 : la limitation de la disponibilité de l'oxygène est un moyen de contrôle ou de prévention du brunissement enzymatique des aliments. Expliquer.

Question N°3 : La lyophilisation consiste à éliminer la majeure partie de l'eau contenue dans un aliment. Les étapes principales sont: première étape: congélation de l'aliment; deuxième étape : sublimation de l'eau. Décrire les deux changements d'état mis en œuvre.

Question N°4 : Pourquoi peut-on conserver un aliment que quelques jours au réfrigérateur et plusieurs mois au congélateur ?

Question N°5 : Les produits alimentaires sont conditionnés sous emballage hermétique. Justifier le conditionnement choisi.

Question N°6 : Au cours de leur conservation, les aliments peuvent s'altérer sous l'action du rancissement. Définir le rancissement et préciser les facteurs le favorisant. Citer deux techniques permettant de l'éviter.

Question N°7 : Quel est le rôle de l'acide benzoïque ajouté comme additif dans certaines denrées alimentaires ? Expliquer. On ajoute à une solution aqueuse d'un jus de fruit une quantité d'acide benzoïque de concentration de 0,7 g/L. Indiquer si cette dose d'acide benzoïque est conforme à la législation.

Question N°8 : Quels sont les inconvénients des techniques de conservation ?

Question N°9 : On soumet un produit à un bain d'eau chaude pendant une durée de temps de 3 min et à une température modérée de 80 °C. Dites de quel procédé s'agit-il ? Citer deux inconvénients de ce procédé.

Question N°10 : Une des méthodes de conservation des aliments est l'utilisation des rayonnements IR. Donner le nom de ce procédé. Citer quelques inconvénients.

Examen De rattrapage – Procédés Agro-alimentaires/2020

Question N°1 : a) Qu'arrive-t-il aux bactéries lorsqu'elles sont refroidies ?

b) Donner le nom des deux principaux procédés de conservation par le froid. Quelle est leur principe commun ? Quel est l'avantage de l'un par rapport à l'autre ?

Question N°2 : Quel procédé de conservation a été inventé par Nicolas Appert à la fin du XVIIIème siècle ? Décrire son principe. Citer les avantages de ce procédé. Quels sont les aliments susceptibles d'être conservés par utilisation de ce procédé.

Examen final – Procédés Agro-alimentaires/ 2019-2020 :

Question N°1 : Parmi les techniques de conservation suivantes préciser lesquelles sont utilisées dans le but de modifier l'activité de l'eau en présence de produits chimiques : lyophilisation, pasteurisation, déshydratation, fermentation, salage, appertisation, modification de l'atmosphère, ionisation/irradiation, sucrage. Donner leur principe.

Question N°2 : Expliquer le principe du procédé de lyophilisation. Citer quelques avantages de cette technique.

Question N°3 : Quelles sont les procédés de conservation des aliments basés sur le phénomène d'osmose ? Expliquer le.

Question N°4 : Qu'est ce qu'une fermentation ? Quel est le principe de la fermentation lactique. Donner sa réaction bilan.

Question N°5 : Quel est le rôle de l'acide benzoïque ajouté comme additif dans certaines denrées alimentaires ?

Question N°6 : Quels sont les différents types de pasteurisation ? Préciser les domaines de températures utilisés dans chacun.

Question N°7 : Citer trois techniques de conservation de produits alimentaires par soustraction de chaleur. Comparer les.

Question N°8 : Les produits alimentaires frais d'origine végétale sont caractérisés par une teneur en eau élevée et une activité de l'eau relativement forte, de l'ordre de 0.9. Différencier les termes : teneur en eau et activité de l'eau.

Question N°9 : Au cours de leur conservation, les aliments peuvent s'altérer sous l'action du rancissement. Définir le rancissement et préciser les facteurs le favorisant. Citer deux techniques permettant de l'éviter.

Question N°10 : On conserve un produit alimentaire dans une enceinte contenant : 70%

N₂ et 30% CO₂. Donner le nom et le principe de ce procédé de conservation. Citer les objectifs recherchés par l'addition de ces deux gaz.

Question N°11 : Quel est l'intérêt de la conservation des aliments ?

Question N°12 : Enumérer les principaux facteurs du développement des micro-organismes dans un aliment.

Examen Final – Procédés Agro-alimentaires/ 2021 :

Question N°1 : Des chocs physiques sur les fruits peuvent être responsables de **brunissement enzymatique**. Rappeler **les réactions** qui en à l'origine et préciser pourquoi un choc peut le favoriser.

Question N°2 : Expliquer l'influence de **l'état de maturité** des fruits sur la **qualité organoleptique** d'un jus de fruit.

Question N°3 : La **conservation par irradiation** consiste à exposer des aliments à des rayonnements électromagnétiques afin de réduire le nombre de micro-organismes qu'ils contiennent. À très haute dose, l'irradiation peut détruire les vitamines ainsi que d'autres nutriments, diminuant ainsi les qualités nutritives des aliments. **La dose de radiation autorisée** pour les oignons est **0,075 kGy**.

Pour traiter des oignons, la radiation utilisée a pour longueur d'onde $\lambda = 1,0 \times 10^{-12} \text{ m}$

Au cours de l'irradiation, **1 kg d'oignons** absorbe **$3,5 \times 10^{14}$ photons**. **Calculer l'énergie totale** absorbée correspondante en **unité Gray**.

Indiquer si la dose de radiation absorbée par les oignons est conforme à la législation.

Question N°4 : Citer deux **avantages** et deux **inconvénients** du procédé de **fumage**.

Question N°5 : Les produits alimentaires sont **conditionnés** sous **emballage hermétique**. **Justifier** le conditionnement choisi.

Question N°6 : Sur quels principes reposent les Techniques de conservation et de transformation des produits alimentaires.

Question N°7 : Quels sont les principaux buts du procédé de conservation par évapo-concentration. Pourquoi on ajoute du sel ou du sucre à un aliment déjà évapo-concentré.

Question N°8 : Quelle est **la principale étape** dans le procédé de lyophilisation. Expliquer.

Question N°9 : Les enzymes présentes naturellement dans les fruits accélèrent leur **maturation**. Donner **deux principaux facteurs** de ralentissement de la réaction de maturation.