

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Alimentaires

Technologie du sucre, des fruits et légumes et des céréales



Dr ACHAT Sabiha

Maître de Conférences

Année universitaire : 2021/2022

SOMMAIRE

Préface

Préambule

Chapitre I : Technologie du sucre (saccharose) et industrie sucrière

Introduction.....	01
I.1. Sucre (saccharose).....	03
I.1.1 Définition et propriétés.....	03
I.1.2 Plantes sucrières.....	05
I.1.2.1. Canne à sucre.....	06
I.1.2.2. Betterave sucrière.....	07
I.1.2.2.1. Culture de la betterave en Algérie.....	09
I.2. Industrie sucrière.....	11
I.2.1. Fabrication du sucre blanc.....	12
I.2.1.1. Réception et lavage	13
I.2.1.2. Extraction du saccharose.....	18
I.2.1.3. Épuration.....	23
I.2.1.3.1. Traitement à la chaux.....	25
I.2.1.4 Évaporation.....	29
I.2.1.4.1. Théorie.....	30
I.2.1.4.2. Choix des conditions d'évaporation.....	30
I.2.1.4.3. Chaudières.....	31
I.2.1.5 Cristallisation.....	31
I.2.1.5.1 Valorisation des mélasses.....	35
I.2.1.6 Séchage, conditionnement et stockage du sucre.....	35
I.3. Sucre de canne.....	36

Chapitre II : Technologie des fruits et légumes

Introduction.....	39
II.1. Catégories de fruits et légumes.....	39
II.1.1. Catégories de fruits.....	39
II.1.2 Catégories de légumes.....	39
II.2. Traitements des fruits et légumes avant conservation industrielle.....	41
II.2.1. Nettoyage et le lavage.....	41
II.2.2 Triage.....	42

II.2.3 Calibrage.....	42
II.2.4 Pelage.....	43
II.2.5. Découpe.....	44
II.3. Technologies de conservation industrielle.....	46
II.3.1 Par la chaleur.....	47
II.3.1.1 Conserve appertisée.....	47
II.3.1.1.1. Emboîtement.....	49
II.3.1.1.2. Jutage.....	51
II.3.1.1.3. Sertissage	51
II.3.1.1.4. Traitement thermique ou autoclavage.....	53
II.3.2. Techniques de conservation par le froid.....	55
II.3.2.1. Réfrigération.....	55
II.3.2.2. Congélation.....	56
II.3.2.3. Surgélation.....	57
II.3.2.4. Techniques de congélation.....	58
II.3.3. Déshydratation	59
II.3.3.1. Mécanisme de l'élimination de l'eau.....	59
II.3.4. Lyophilisation.....	62
II.3.5. Conservation par acidification.....	63
II.3.5. Autres techniques.....	64
II.3.5.1. Modification de l'atmosphère.....	64
II.3.5.2. Ionisation.....	64
II.4. Transformation industrielle.....	65
II.4.1. Définitions	65
II.4.2. Prétraitements.....	66
II.4.2. Broyage.....	66
II.4.4. Extraction ou pressage.....	66
II.4.4.1. Pressage par piston.....	67
II.4.4.2. Presse à bandes.....	67
II.4.4.3. Presse vis sans fin.....	68
II.4.4.4. Autres extracteurs.....	69
II.4.4.5. Stabilisation des jus.....	70
II.4.4.6. Pasteurisation des jus.....	71
II.4.4.7. Concentration des jus.....	71
II.4.4.8. Stockage des jus.....	71

Chapitre III : Technologie des céréales

Généralité.....	72
III.1. Céréales dans le monde.....	72
III.1.1. Données économiques et production.....	73
III.1.1.2. Marché Mondial.....	73
III.1.1.3. Marché National.....	75
III.1.1.4.1. Pays fournisseurs de l'Algérie en céréales.....	76
III.2. Structure des grains	77
III.2.1. Description du blé et du grain de blé.....	77
III.2.2. Structure physique des grains de céréales.....	77
III.2.2.1. Enveloppes.....	78
III.2.2.2. Albumen.....	78
III.2.2.3. Germe.....	79
III.2.3. Composition biochimique des grains.....	80
III.2.3.1. Glucides.....	81
III.2.3.2. Lipides.....	81
III.2.3.3. Protides et les protéines.....	82
III.2.3. 4. Vitamines et les matières minérales.....	83
III.2.3.5. Eau.....	84
III.2.3.6. Enzymes.....	84
III.3. Transformation industrielle des plantes céréalières.....	85
III.3.1. Procédés de meunerie et de semoulerie.....	85
III.3.2. Réception du blé.....	86
III.3.2. Nettoyage des grains.....	86
III.3.2.1. Nettoyeurs industriels.....	87
III.3.2.2. Tarare.....	88
III.3.2.3. Nettoyeur-séparateur.....	89
III.3.2.4. Tables densimétriques.....	90
III.3.2.5. Nettoyeur rotatif.....	91
III.3.2.6. Autres nettoyeurs et nettoyage.....	92
III.4. Conditionnement.....	93
III.4.1. Meunerie.....	93
III.5. Mouture du blé.....	93
III.5.1. Principes de la mouture.....	94
III.5.2. Transformation du blé tendre en farine.....	94

III.5.2.1. Broyage.....	95
III.5.2.2. Blutage.....	96
III.5.2.3. Claquage et convertissage.....	97
III.5.2.4. Sassage.....	98
III.5.2.5. Curage du son.....	99
III.5.2.6. Conditionnement et commercialisation.....	99
III.6. Panification	101
III .6.1. Définition.....	101
III.6.2. Principe de la panification.....	101
III.6.3. Matières premières en panification.....	102
III.6.4. Agents de fermentation	102
III.6.4. Sel.....	103
III.6.5. Eau.....	103
III.6.6. Améliorants	103
III.7. Farine de fève.....	103
III.8. Produits maltés.....	104
III.8.1. Poudre du gluten.....	104
III.8.2. Acide ascorbique.....	104
III.8.3. Lécithine.....	105
III.8.4. Sucres.....	105
III.9. Technologie de panification.....	105
III.10. Etapes de panification.....	105
III.10.1. Pétrissage.....	105
III.10.2. Fermentation (pousse ou pointage)	107
III.10.3. Pesée et le façonnage.....	108
III.10.4. Cuisson.....	108
III.10.5. Ressuage.....	108

Références bibliographiques

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Chapitre I : Technologie du sucre (saccharose) et industrie sucrière		
01	La production et la consommation de sucre dans le monde (2012-2017)	02
02	Les principaux pays producteurs et consommateurs du sucre	03
03	Formation, hydrolyse et structure chimique de la molécule de saccharose.	04
04	La photosynthèse oxygénique	05
05	La canne à sucre	06
06	Variétés de betteraves	07
07	La betterave sucrière	07
08	Composition biochimique de la betterave sucrière	08
09	La pratique de la fabrication du sucre	12
10	Schéma des étapes du procédé de fabrication du sucre à partir de la betterave sucrière.	13
11	Cour de réception de la betterave	14
12	Déchargement lors de la réception de la betterave	14
13	Schéma simplifié de l'atelier de lavage de la betterave sucrière.	17
14	Lavage de la betterave sucrière.	17
15	Schéma et forme des cossettes de forme « Faitière »	18
16	Schéma de l'extraction du saccharose par diffusion	19
17	Schéma d'une cellule de betterave avant et après le chauffage	20
18	Diffuseur horizontal à tube tournant	21
19	Schéma du procédé de diffusion basé sur le principe d'osmose	21
20	Schéma des étapes au cours de la diffusion	22
21	Valorisation des pulpes de l'étape de diffusion des cossettes	23
22	Schéma des étapes d'extraction du sucre et de l'épuration calco-carbonique.	24
23	Schéma du principe général de l'épuration calco-carbonique.	25
24	Filtration du jus en sucrerie	28
25	Système d'évaporation en sucrerie	29
26	Schéma des étapes d'évaporation du jus sucre épuré.	29
27	Circuit de l'eau lors de la fabrication du sucre.	31
28	Système de cristallisation en sucrerie	32
29	Les étapes de la cristallisation	32
30	Atelier de séchage	36
31	Stockage du sucre	36
32	Du sucre de canne en sucre granulé	37
33	Comparaison du processus de fabrication du sucre	37
34	Les co-produits en sucrerie	38
Chapitre II : Technologie des fruits et légumes		
35	Exemples de lavage	42
36	Exemples de calibrage des fruits et légumes	43
37	Eboutage des haricots verts	44
38	Découpage des fruits et légumes	44

39	Machine de blanchiment a l'eau bouillante	45
40	Machine de blanchiment à la vapeur	46
41	Apparition des boites de conserves	47
42	Schéma et diagramme d'appertisation des fruits et légumes.	48
43	Exemples de produits appertisés : fruits et légumes, soupes et sauces	49
44	Quelques exemples d'emballage destinés à l'appertisation	49
45	L'emboitage volumétrique	50
46	Techniques d'emboitage par pesée et automatique	50
47	Juteuse automatique	51
48	L'opération de sertissage et technique de fermeture des boites	52
49	Principe de fonctionnement de l'autoclave vapeur	53
50	Autoclavage des soupes	54
51	Equipements de conservation des fruits et légumes par le froid	59
52	Diagramme général de conservation par séchage.	60
53	Procédés de séchage thermique : soleil, séchoirs et tambour rotatif	62
54	Le lyophilisateur et la lyophilisation	63
55	Transformation industrielle des fruits	65
56	Principe du pressage par piston	67
57	Principe de fonctionnement du pressage a bande	68
58	Presse vis sans fin	69
59	Stabilisation des jus	70
Chapitre III : Technologie des céréales		
60	Exemple de quelques plantes de la famille des Poacées	72
61	Cercle représentatif des différentes parts de céréales en quantités pour l'année	75
62	Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en blé tendre pour l'année 2016.	76
63	Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en blé dur pour l'année 2016.	76
64	Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en orge pour l'année 2016.	76
65	Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en maïs pour l'année 2016.	77
66	Le blé et du grain de blé	77
67	Schéma histologique d'une coupe longitudinale d'un grain de blé	78
68	Schéma de cellules de l'albumen	79
69	Grain de sorgho	80
70	Schéma de fixation de l'eau dans un grain de céréale	84
71	Schéma du nettoyage des grains	86
72	Diagramme type de nettoyage des blés	88
73	Schéma d'un tarare	88
74	Schéma et exemple d'un nettoyeur-séparateur	89
75	Les tables densimétriques	90
76	Schéma de nettoyeur rotatif	91
77	Première transformation des céréales	93
78	Opérations Unitaires de Mouture	94
79	Etapes de la mouture du blé tendre en farine	95
80	Principe de fonctionnement du broyage et produits de la mouture : diversité et variabilité	95

81	L'appareil à Cylindres	96
82	Tamisage des produits de la mouture	96
83	Principe de tamisage dans les plansichters	97
84	Le claqueur et le convertisseur	98
85	Principe du sassage et le sasseur	98
86	Les produits du sasseur	99
87	Conditionnement de la farine	99
88	Composition chimique de la farine	100
89	Les entreprises productrices dans la filière céréales en Algérie	101
90	Types de levures et de levains	102
91	Pétrissage	105
92	Pointage et découpage	106
93	Réseau (Coupe en microscopie optique d'une pâte à pain crue) et formation du gluten.	107
94	Structure de la pâte à pain et du pain : respectivement pâte à pain, amidon et réseau de gluten et "trous de fermentation" résultant des bulles de CO2 dans la mie.	107

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Chapitre I : Technologie du sucre (saccharose) et industrie sucrière		
01	Composition de la racine de betterave (valeurs en g/100g de betterave à sucre)	08
02	Comparaison entre les objectifs et les résultats moyens réalisés dans l'agriculture et l'industrie de la betterave sucrière (1969-1979) Khemis-Miliana	10
03	Culture de la betterave sucrière et production du sucre en Algérie (1967-1983)	10
04	Potentiel de production de sucre en Algérie en 2015	11
05	Analyse type d'une solution en sortie de diffusion	22
06	Réactions mises en jeu lors de la 2eme carbonatation	27
07	Analyse type d'une solution après épuration calco-carbonique.	28
Chapitre II : Technologie des fruits et légumes		
08	Les différentes catégories de fruits	40
09	Les différentes catégories de légumes.	40
10	Exemples de barème de stérilisation pour des produits conditionnés en boîtes métalliques.	54
11	Exemples de fruits et légumes réfrigérés avec leur durée de conservation	56
12	Les techniques d'élimination de l'eau par voie mécanique	61
Chapitre III : Technologie des céréales		
13	Famille des Poacées	72
14	Le marché mondial des céréales entré 2015/2020 en million de tonnes (FAO)	74
15	Principaux exportateurs des céréales	74
16	Principaux exportateurs du blé	74
17	Principaux exportateurs du riz	74
18	Principaux exportateurs du maïs	75
19	Comparaison des parties structurantes de plusieurs céréales (en % du grain entier).	80
20	Composition biochimique succincte de diverses céréales (grains nus)	81
21	Distribution des glucides dans les fractions de blé (g/100 grs)	81
22	La composition en acides gras des lipides des grains de blé (en pourcentage du total des acides gras)	82
23	Vitamines présentes dans le blé	83
24	Distribution de la vitamine du groupe B (g/100g) dans les différentes parties du grain de blé	83
25	Minéraux présents dans le blé	83
26	Eléments minéraux repartis dans les différentes parties du grain de blé	84
27	Différences entre les deux espèces de blé	85
28	Principales machines de nettoyage des blés avant broyage	87
29	Les différents types de farines	100

Préface

Ce support de cours évoque la technologie du sucre, des fruits et légumes et des céréales. D'un point de vue pédagogique il s'adresse tout autant aux étudiants de la filière des Sciences Alimentaires (Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie), de diverses spécialités en Master 1 : Contrôle de Qualité et Analyse des Aliments (CQAA), Qualité des Produits Sécurité Alimentaire (QPSA) et Technologie Alimentaire (TA) ou encore aux étudiants de l'une des formations de Génie des procédés : Génie alimentaire. Il peut également servir des industriels de la transformation alimentaire, de nombreux exemples d'opérations unitaires ainsi que d'applications concrètes seront présentés.

Afin de présenter l'ensemble de ces opérations unitaires mises en jeu dans la technologie et la conservation de certains aliments au sein d'une entreprise alimentaire et pour faciliter la lecture et la compréhension de ce cours, le contenu du photocopié est scindé en trois parties : industries sucrière, céréalière et celle des fruits et légumes, enrichies par plusieurs illustrations. Ces différentes unités d'apprentissage et cet enchaînement logique permettront à l'apprenant d'acquérir des compétences non seulement sur le plan fondamental concernant les différentes filiales de l'agro-alimentaire mais également, sur les techniques de production.

Je souhaite une bonne lecture de l'ensemble du photocopié de ce cours et qu'il deviendra un instrument intéressant pour les universitaires et même pour les industriels.

Dr ACHAT S

Préambule

L'agro-industrie est l'ensemble des industries ayant un lien direct avec l'agriculture. Cela comprend donc l'ensemble des systèmes de productions agricoles et s'étend à toutes les entreprises qui fournissent des biens à l'agriculture, ainsi qu'à celles qui transforment les produits agricoles et le conditionnent en produits commercialisables. Les industries alimentaires sont beaucoup plus homogènes et faciles à classer car leurs produits ont la même utilisation finale.



La diversité des produits alimentaires présents sur les étagères des supermarchés ne surprend pas les consommateurs qui se sont habitués à voir de plus en plus d'aliments fabriqués à l'aide de procédés très différents. En effet, au fur et à mesure que les connaissances augmentent dans les domaines de la microbiologie, de la chimie, du génie et de l'emballage, l'industrie alimentaire met sur le marché des produits de plus en plus nombreux dont la qualité s'améliore constamment. Il faut reconnaître que l'aliment est un système complexe.

La plupart des techniques de conservation sont utilisées de façon identique pour une grande diversité de denrées périssables : fruits, légumes, lait, céréales, viande ou poisson. Pour ces denrées, la transformation vise surtout à assurer la conservation, d'où la nécessité de déterminer les moyens nécessaires pour prolonger la durée de vie de l'aliment. Les premières opérations liées à la conservation des aliments et qui se rencontrent dans presque toutes les usines alimentaires sont le chauffage et le refroidissement. Il est rare que dans une usine alimentaire, le produit ne soit pas chauffé ou refroidi à un moment ou à un autre.

En Algérie

L'industrie agro-alimentaire est la deuxième après celle de l'énergie, elle



Dans ce cours, les technologies ou opérations unitaires en industrie agroalimentaire (sucres, fruits et légumes et céréales) sont traitées, ainsi ce polycopié est organisé en trois chapitres, chacun subdivisé en plusieurs sous titres, encadré par une préface et une introduction générale.

Le support de cours présenté, a visé dans un premier temps à éclaircir la technologie du sucre de table (saccharose) et industrie sucrière à savoir, des généralités sur la production du sucre, la description, la composition et la culture des plantes sucrière essentiellement la betterave et la canne. Le procédé d'extraction et de fabrication du sucre a été aussi succinctement décrit.

- Le deuxième chapitre est consacrée à la filière des fruits et légumes, notamment la catégorie de ces matrices végétales ainsi que les données économiques et production. Les traitements et technologies des fruits et légumes avant et durant la conservation industrielle (la chaleur, le froid et autres techniques) sont aussi détaillées.

- Le troisième volet est voué aux plantes céréalières ; en donnant un aperçu général sur les données économiques et production, tout en abordant d'une part les grains des céréales (description, structure et composition), d'autre part la transformation industrielle et conservation des produits céréaliers (meunerie, semoulerie et panification)

Chapitre I : Technologie du sucre (saccharose) et industrie sucrière

Introduction

Chargé de plusieurs millénaires d'histoire, le sucre n'est l'aliment que l'on connaît aujourd'hui que depuis un petit peu plus d'un siècle. Le premier produit sucré consommé fut le miel. Ainsi, ce produit a depuis des temps immémoriaux, été une denrée légendaire, divine, inaccessible aux humains. En pratique cependant, sa production a toujours été limitée tout comme sa conservation. De plus, sa cueillette et sa culture subissent les aléas climatiques et il reste une denrée rare et chère, notamment par le fait que la ruche soit une structure vulnérable. C'est pourquoi l'être humain a toujours exploré d'autres voies pour obtenir de façon abondante cette substance. Le goût sucré est présent dans de nombreux végétaux notamment par le biais de leurs fruits. Sa saveur douce, la propriété qu'il a de servir de condiment aux boissons, aux aliments et aux médicaments, l'ont fait placer au nombre de ces substances dont il a toujours été difficile de se passer. Les Hommes se sont essayés à une multitude de plantes avant d'en trouver deux en particulier qui pouvaient répondre à leurs besoins sucriers : la betterave sucrière et la canne à sucre.

La consommation de sucre proprement dite n'a commencé qu'au 16^{ème} siècle avec l'implantation de la culture de la canne. Au 19^{ème} siècle, la betterave est venue compléter la production de sucre de canne :

- En 1575, Olivier de Serres, signalait la richesse de la betterave en sucre ;
- En 1747, le chimiste allemand Andreas Margraff établit la composition du sucre de betterave comme étant du saccharose, similaire au sucre cristallisable obtenu de la canne à sucre qui était à cette époque, la principale source de sucre commercial ;
- En 1786, Frédéric Achard, porte le procédé sur le plan industriel et il installe en Silésie de petites sucreries de betteraves ;
- En 1801, la première raffinerie de sucre à partir de la betterave à sucre a été établie.

L'intérêt pour cette industrie a été doublé grâce au jumelage de la culture de la betterave à sucre avec la production laitière par l'utilisation des feuilles (ensilage) et des résidus (cossettes) de l'extraction des racines pour l'alimentation du bétail.

- Données économiques

Entre les années 1910 et 2000, la production mondiale de sucre est passée d'environ 10 millions de tonnes à 135 millions de tonnes. La production et la consommation de sucre au niveau mondial de 2012 jusqu'à 2017 sont représentées dans la figure ci-dessous :

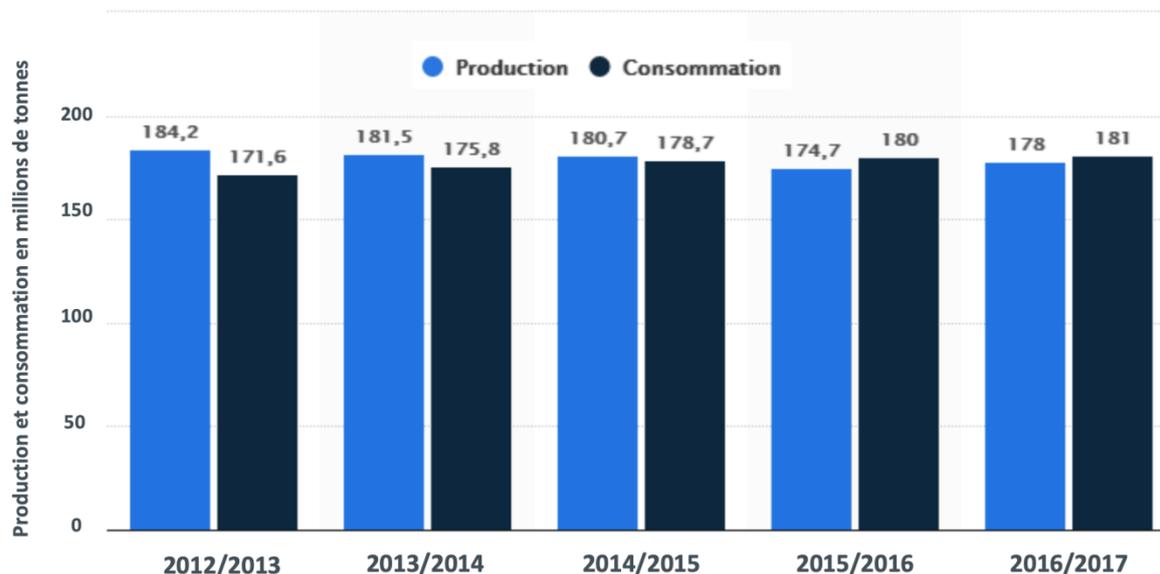


Figure 1: La production et la consommation de sucre dans le monde (2012-2017)

L'industrie sucrière approvisionne les marchés mondiaux en sucre via les deux sources végétales majoritaires (la canne et la betterave). En plus de ses utilisations culinaires, la canne à sucre est également utilisée pour la production de biocarburants tels que l'éthanol. La production mondiale de la canne à sucre est estimée à 1,9 milliard de tonnes en 2014, dont plus de 737 millions de tonnes provenant d'un géant du sucre : le Brésil. L'Inde, la Chine, la Thaïlande et le Pakistan sont les principaux pays producteurs de la canne à sucre après le Brésil. En parallèle à la production de la canne à sucre, environ 267 millions de tonnes de betteraves sucrières ont été produites dans le monde la même année, la France et la Russie en produisent la plus grande partie. Le Brésil arrive ainsi en tête de liste des pays exportateurs de sucre en 2016/2017 avec un montant d'exportation supérieur à 28,15 millions de tonnes et les prévisions pour 2020/21 élargiraient considérablement la marge par rapport à l'Inde, deuxième pays producteur au monde. Côté importations, la Chine, l'Indonésie et les États-Unis sont considérés comme étant les principaux pays importateurs de sucre. En termes de consommation de sucre, le Brésil ne se classe qu'au cinquième rang car la part la plus élevée de la production est destinée aux exportations (**Fig.2**). La campagne agricole 2020/21 prévoit d'atteindre plus de 42 millions de tonnes (soit un chiffre des plus élevés depuis au moins 12 ans).

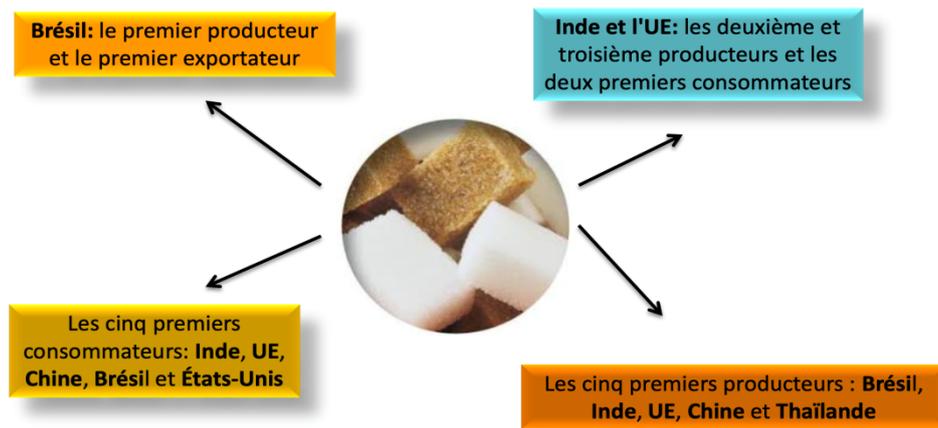


Figure 2: Les principaux pays producteurs et consommateurs du sucre

Les échanges internationaux de sucre portent sur environ 55 MT et les 2/3 étant du sucre brut et le reste du sucre blanc. Le marché des importations de sucre est beaucoup moins concentré. On trouve en tête de liste de grands pays consommateurs (UE, Indonésie, Chine, États-Unis, ...) mais également des pays pratiquant le raffinage "à destination" (Émirats Arabes Unis, Malaisie, Algérie, Corée du sud,...). Depuis le début des années 90, certains pays du Moyen-Orient et d'Asie non producteurs ont construit des raffineries de sucre brut, pour importer du sucre brut plutôt que du sucre blanc, le raffiner en blanc pour leur consommation intérieure ou pour l'exportation.

L'Algérie est le 7ème plus gros importateur mondial de sucre avec 1,53 million de tonnes annuelles (selon ISO). La consommation moyenne de sucre en Algérie est de 24 kg par habitant et par an.

- Les achats de sucre en 2016 ont augmenté à 871,7 millions de dollars contre 714,76 millions de dollars en 2015.
- Les importations en sucre ont marqué une hausse à 2,03 millions de tonnes contre 1,93 million de tonnes.

I.1. Sucre (saccharose)

I.1.1 Définition et propriétés

Le terme de sucre vient du sanskrit : "Sarkara", langue sacrée des brahmanes, « Saccharum » en latin. Il recouvre aujourd'hui une gamme large de produits. Toutefois, cette dénomination était à l'origine réservée uniquement au saccharose. Cette dernière est composée de deux monosaccharides, α -D-glucose et β -D-fructose, avec une liaison glycosidique entre le premier carbone de glucose et le deuxième carbone de fructose (**Fig.3**). Ce lien fait du saccharose un

sucres non réducteurs car ils impliquent les groupements réducteurs de chaque monosaccharide. Il est l'ingrédient sucré traditionnel le plus commun dans la nourriture. Le saccharose a une masse molaire est de 342,30 g/mole, il se présente sous forme cristalline, sa densité est de 1588 kg/m³ et son point de fusion de 160 °C, mais il se décompose à partir de 150 °C. Ce type de sucre s'hydrolyse facilement en milieu acide. L'hydrolyse enzymatique est réalisée par deux osidases (**Fig.3**): l' α -glucosidase et la β -fructosidase ; « invertase » car le mélange des monoses, du fait du fort caractère lévogyre du fructose, garde cette propriété (20 °C), dénommé ainsi sucre inverti. L'invertase est largement répandue, notamment dans l'intestin humain.

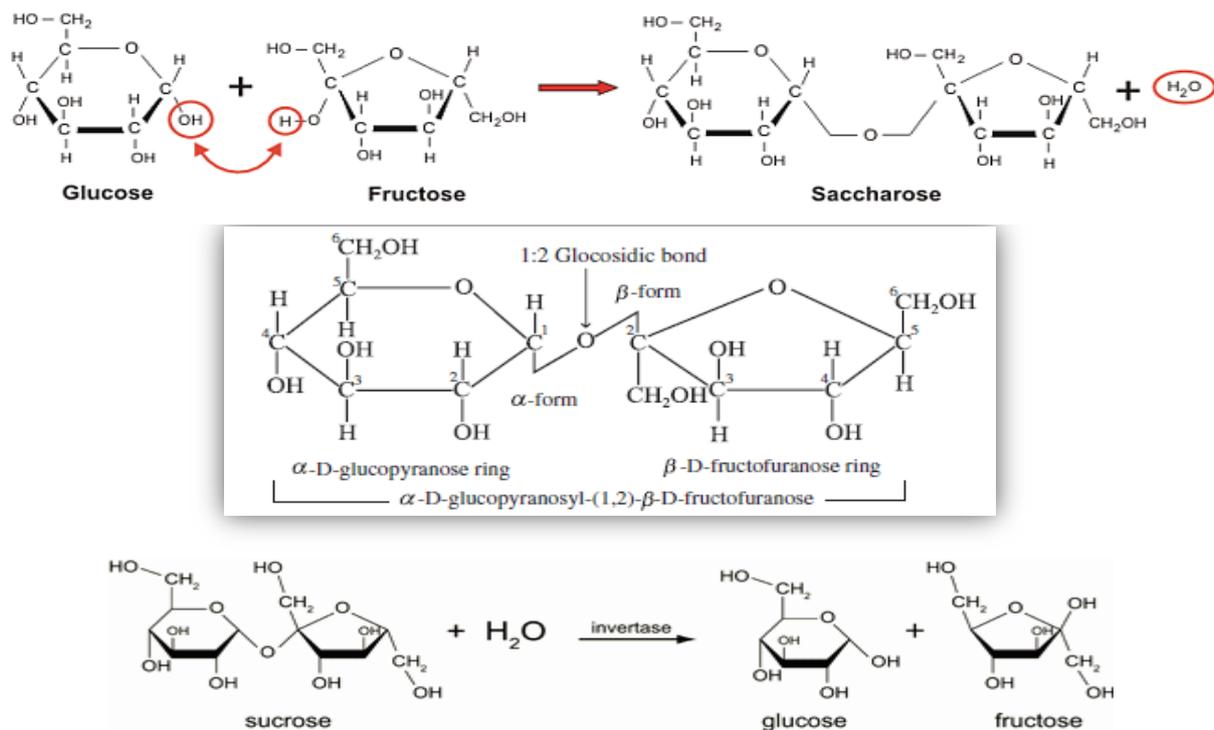


Figure 3: Formation, hydrolyse et structure chimique de la molécule de saccharose.

- Stable, stockable, peu cher et de qualité constante, le saccharose est utilisé directement par la plupart des industries. Il est de loin le plus répandu des glucides simples élaborés par la nature et c'est ainsi que le terme «sucre», au singulier, désigne légalement le diholoside. Le saccharose existe dans toutes les plantes contenant de la chlorophylle. Qu'il soit extrait de la canne ou de la betterave, la fabrication du «sucre» ne fait appel qu'à des procédés d'extraction et de purification très simples, sans aucune utilisation d'additifs ni de produits de synthèse. Il faut relever que c'est l'industrie du sucre qui produit dans le monde les plus forts tonnages de produits purs et que l'obtention de cette pureté du saccharose qui dépasse couramment les

99,9% ne fait pas appel à des processus chimiques très complexes. Le saccharose peut avoir aussi des applications non alimentaires : la teinture du cuir, l'encre des imprimantes et l'industrie du textile.

I.1.2 Plantes sucrières

Peut être rencontré chez Plus de 560 espèces de plantes qui produisent des fruits sucrés ou une sève contenant du sucre (Palmiers, érable à sucre), mais son extraction industrielle est peu rentable (Tubercule de tige de sorgho (10 à 15%), tige de maïs (7 à 9%), noix noisette, amande ou la sève de certains arbres (bouleau, palmier, érable). Les sucres produits par la grande majorité de ces espèces contiennent très peu ou pas de saccharose et sont des combinaisons de monosaccharides (glucose, fructose, mannose, etc.) qui n'ont pas la capacité de cristalliser lorsqu'ils sont concentrés. A l'exception de la canne à sucre, la betterave sucrière et exceptionnellement l'érable (au USA et Canada) aucune plante ne donne lieu à une exploitation industrielle. L'Homme a essayé une multitude de plantes (le palmier dattier, l'érable, le sorgho.etc...) avant d'en trouver deux en particulier qui pouvaient répondre à leurs besoins sucriers. Ainsi, deux cultures principales atteignent un niveau commercial : la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) et la betterave sucrière (*Beta vulgaris*). Ces plantes possèdent la particularité d'avoir comme glucide de réserve le saccharose, résultant de la synthèse chlorophyllienne et de le stocker sous forme de solution aqueuse dans les cellules. Le sucre s'accumule au niveau de la racine (betterave) ou la tige (canne), il est formé par photosynthèse (Fig.4) selon les réactions suivantes :

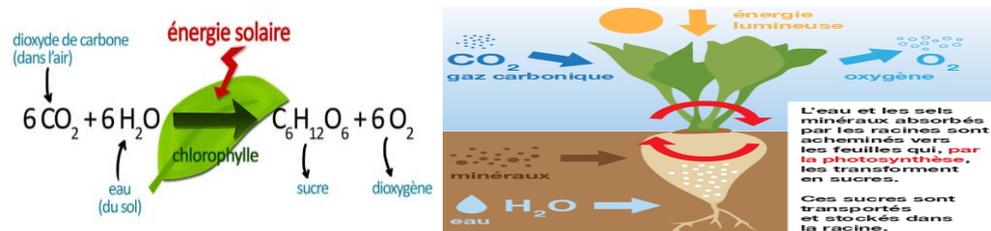


Figure 4: La photosynthèse oxygénique

I.1.2.1. Canne à sucre

La canne à sucre (**Fig.5**) est une plante qui appartient à la famille des poacées ou des graminées du genre *Saccharum*, principalement utilisée pour produire du sucre extrait des tiges (ou chaumes). Elle est essentiellement exploitée dans les zones ensoleillées avec un climat chaud modérément humide : tropicales et subtropicales. Ainsi sa culture nécessite de forts taux d'ensoleillement et de chaleur, son rendement peut atteindre 70 t/ha. D'une hauteur allant de 2,5 à 6 m, les tiges ont un diamètre de 1,5 à 6 cm, de couleur différente selon les variétés (**Fig.5**), les tiges cylindriques de la plante sont gorgées d'un liquide contenant de 13 à 18 % de saccharose.

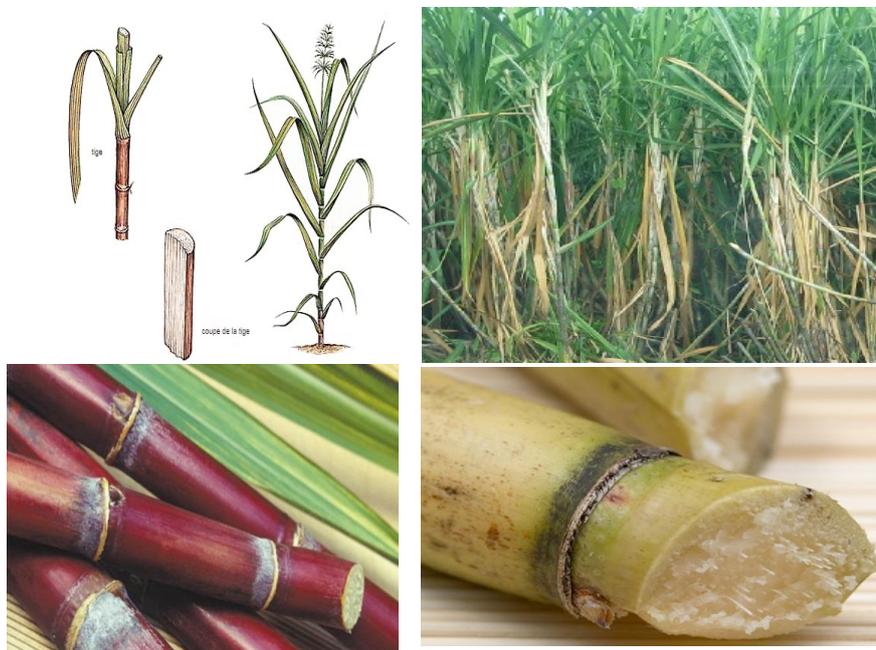


Figure 5 : La canne à sucre

- La canne à sucre est composée environs :
 - 71 % d'eau
 - 14 % de saccharose ;
 - 13 à 14 % de fibres ligneuses ;
 - 2 à 3 % d'impuretés.

La canne à sucre était jusqu'au début du XIXe siècle la seule source importante de sucre et représente encore, au XXIe siècle, 70 à 80 % de la production de sucre. Sa production annuelle dépasse 1,9 milliard de tonnes (matière fraîche), environ 570 millions de tonnes (matière sèche), et est l'une des principales plantes cultivées au monde.

I.1.2.2. Betterave sucrière

La betterave appartient à la famille des Chénopodiacées, est une espèce bisannuelle. C'est une plante cultivée pour sa racine charnue utilisée (**Fig.6**) :

- Pour la production du sucre (betteraves sucrières), à chair blanche ;
- Comme plante fourragère, alimentation du bétail (betteraves fourragères), sa chair est de couleur rouge ou blanche ;
- Comme légume dans l'alimentation humaine (betteraves potagères), à chair rouge



Betterave sucrière



Betterave fourragère



Betteraves potagères

Figure 6 : Variétés de betteraves :

- La betterave sucrière (**Fig. 6,7**) est un type de betteraves, utilisée principalement pour la production du sucre (composée de 15 à 18% de saccharose), dont 80 % peut être extrait par un processus industriel.

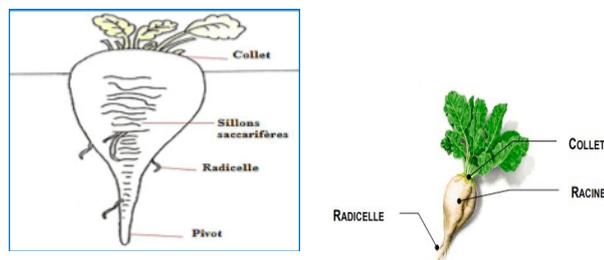


Figure 7: La betterave sucrière

- La composition biochimique de la betterave sucrière (**Fig.8, Tab.1**) est fonction de sa variété génétique, des facteurs agronomiques, des conditions de végétation et des infrastructures de la récolte.

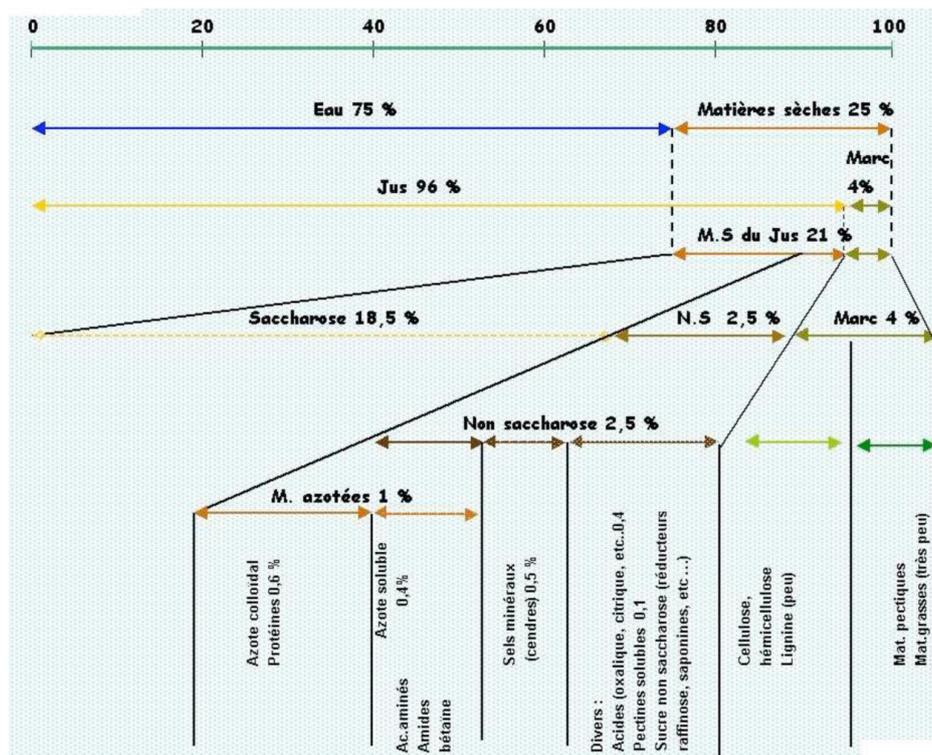


Figure 8 : Composition biochimique de la betterave sucrière.

Tableau 1: Composition de la racine de betterave (valeurs en g/100g de betterave à sucre):

Eau	73-76,5
Matière sèche	23,5-27
Saccharose	14-21
Composés insolubles (marc) :	4,5-5
<ul style="list-style-type: none"> • Cellulose • Hémicellulose • Pectine • Lignine • Protéines • Saponines • Lipides • Cendres 	<ul style="list-style-type: none"> 0,9-1,2 1,1-1,5 0,9-2,4 0,1-0,3 0,1-0,4 ≤ 0,1 ≤ 0,1 Traces
Composés solubles :	2-2,5
<ul style="list-style-type: none"> • Composés organiques non-azotés • Glucose, fructose • Pectine • Acides organiques • Raffinose • Lipides • Saponines • Autres 	<ul style="list-style-type: none"> 0,9-1,1 0,1-0,2 0,1-0,3 0,2-0,5 ≤ 0,1 ≤ 0,1 ≤ 0,1 ≤ 0,1

La racine de la betterave comporte une armature cellulosique et pectique insoluble, constituant principal des membranes cellulaires que l'on trouve dans le marc. L'extrait sec de

la racine représente environ 25% de son poids et comprend outre le marc, les matières sèches dissoutes dans l'eau. Ces substances dissoutes sont minérales ou organiques. La betterave à sucre comporte aussi une phase liquide, ou suc cellulaire, très riche en eau, soit environ 75% du poids de la racine.

- Ce légume-racine est principalement cultivé dans les climats tempérés de l'Amérique du Nord, de l'Asie et de l'Europe. La culture de la betterave convient aux grandes plaines tempérées du Nord de la France; elle se caractérise par d'assez bons rendements (entre 50 et 90 t/ha) variant selon la qualité du semis, du sol, des soins et du climat. La récolte s'effectue à partir de septembre avec des durées de campagne de deux à trois mois en moyenne par an. La superficie mondiale des cultures de betteraves sucrière est d'environ 4,5 millions d'hectares, principalement en Europe et aux États-Unis. Sa production mondiale (FAO, 2014) est de 270 millions de tonnes.

I.1.2.2.1 Culture de la betterave en Algérie

Introduite par les autorités coloniales en 1940. Deux usines furent construites : l'une à Sfisef (Sidi-Bel-Abbès) fabricant du sucre, l'autre à Chelef distillerie produisant de l'alcool ;

- En 1966, la sucrerie de Sidi Lakhdar dans la plaine de Khemis-Miliana commençait à fonctionner avec une capacité de traitement de 150000 tonnes de racines/an ;
- En 1970, une raffinerie de sucre roux d'importation d'une capacité de traitement de 99 000 tonnes par an a été intégrée à la sucrerie de betterave déjà existante, constituant ainsi un complexe « sucrerie-raffinerie ».
- L'industrie sucrière a été consolidée en 1974 par la réalisation d'une même raffinerie à Mostaganem ainsi qu'une même sucrerie-raffinerie à Guelma, mais la production de la betterave sucrière fût suspendue plus tard, en 1983, pour des raisons de rentabilité économique (**Tab.2,3**).

- La disparition du maillon agricole de la filière a réduit cette industrie au raffinage de sucre roux dans le cadre d'une entreprise publique économique appelée Enasucré. Cependant, le mouvement de libéralisation de l'économie Algérienne en 1993, a conduit à la privatisation de cette entreprise en 2007 au profit d'opérateurs locaux. Cette opération a abouti à de nouvelles appellations des trois raffineries privatisées : Rassilasucré de Sidi-Lakhdar (ex-Khemis-Miliana) et Rassilasucré de Mostaganem qui sont désormais la propriété du Groupe Berrahal; et Sorasucré de Guelma reprise par le Groupe Prolipos.

Tableau 2: Comparaison entre les objectifs et les résultats moyens réalisés dans l'agriculture et l'industrie de la betterave sucrière (1969-1979) Khemis-Miliana

Agriculture			Industrie		
Principaux Critères	Objectifs	Résultats Moyens 1969-1979	Principaux critères	Objectifs	Résultats moyens 1969-1979
Superficie (Ha)	3 750	2 367	Utilisation des capacités de transformation (%) Production (T) Taux d'extraction (%) Coût de production (DA/T)	100	31
Production (T/an)	150 000	54 914		18 000	4 000
Rendement (T/Ha)	40	23		12	8,5
Richesse en sucre (%)	≥ 16	15		≤ 1 250	10 304
Tare (%)	≤ 10	26			
Coût de production (DA/T)	151	190			

Tableau 3: Culture de la betterave sucrière et production du sucre en Algérie (1967-1983)

Périodes	1967-1969	1970-1973	1974-1977	1979-1983
Superficie 10 ³ Ha	3,1	2,8	2,9	3,6
Production moyenne 10 ³ Qx	73	561	573	600
Rendement Qx/Ha	23,5	200,4	197,6	166,7
Dispo en Kg/an/habitant	0,6	4,0	3,6	3,1

Cette opération de privatisation a été précédée en 1998 par l'apparition d'un groupe privé appelé Cevital qui a réalisé deux raffineries de sucre : l'une en 2002 d'une capacité de traitement de 1600 T/jour, l'autre en 2008 d'une capacité de 3000 T/jour ; soit au total 4600 T/jour. Avec cette capacité totale d'environ 1.5 millions de tonnes par an, cette entreprise couvre l'essentiel des besoins du marché local et exporte le surplus à des pays du Maghreb, d'Afrique et de l'UE. Ces exportations sont régulières depuis 2009, avec un volume qui a atteint 476486 tonnes en 2014. Cet essor a été encouragé par la politique de l'Etat consistant à taxer fortement le sucre blanc d'importation (30%) par rapport au sucre roux importé (5%). Le Groupe Cevital s'impose comme leader en détenant un quasi-monopôle avec une part de 80% du marché sucrier local. Cette situation tend aujourd'hui à disparaître avec l'entrée en production en 2015 d'une raffinerie du Groupe Labelle à Boumerdès (**Tab.4**) et en 2017 d'une autre (Grande Raffinerie Oranaise) par le Groupe Berrahal à Oran.

Tableau 4: Potentiel de production de sucre en Algérie en 2015

Entreprises	Capacité de traitement		Capacité de production	
	/jour	/an	/jour	/an
Groupe Cevital	4 600	1 610 000	4 140	1 449 000
Groupe Labelle	1 000	350 000	900	315 000
- Groupe Berrahal:	2 660	898 000	2 394	538 200
- Rassilasucré Sidi-Lakhdar	330	99 000	297	89 100
- Rassilasucré Mostaganem	330	99 000	297	89 100
- Grande Raffinerie Oranaise	2 000	700 000	1 800	360 000
Sorasucré Guelma	330	99 000	297	89 100
Total	8 590	2 957 000	7 731	2 391 300

Unité : Tonne

Face à une consommation locale qui avoisine 1,5 millions de tonnes par an en 2015, il apparaît que le marché Algérien du sucre tend à être de plus en plus excédentaire grâce au potentiel de production existant, d'où la nécessité du recours à l'exportation.

- La relance de la betterave sucrière en Algérie a été annoncée en 2011, mais vite abandonnée (importation de sucre brut moins cher, prix du baril de pétrole en hausse)

I.2. Industrie sucrière

La sucrerie est une industrie de séparation, qui permet d'isoler le sucre des autres constituants de la betterave ou de la canne. Cette séparation est rendue possible grâce à la succession d'opérations unitaires (**Fig.9**) :

- L'atelier de « **Réception et lavage** » permet d'éliminer les impuretés extérieures (Terre, pierre, débris végétaux,...)
- L'extraction du sucre par « **diffusion** » permet le transfert du sucre contenu dans la cellule tout en limitant celui des impuretés (osmose).
- Les étapes d'« **épuration** » et de « **filtration** » éliminent les impuretés dissoutes
- Les étapes ultimes de concentration par « **évaporation** » et de « **crystallisation** », éliminent l'eau et aboutissent au sucre blanc.
- Les étapes de « **séchage** » et de « **conditionnement** » parachèvent ce long chemin parcouru depuis la betterave.

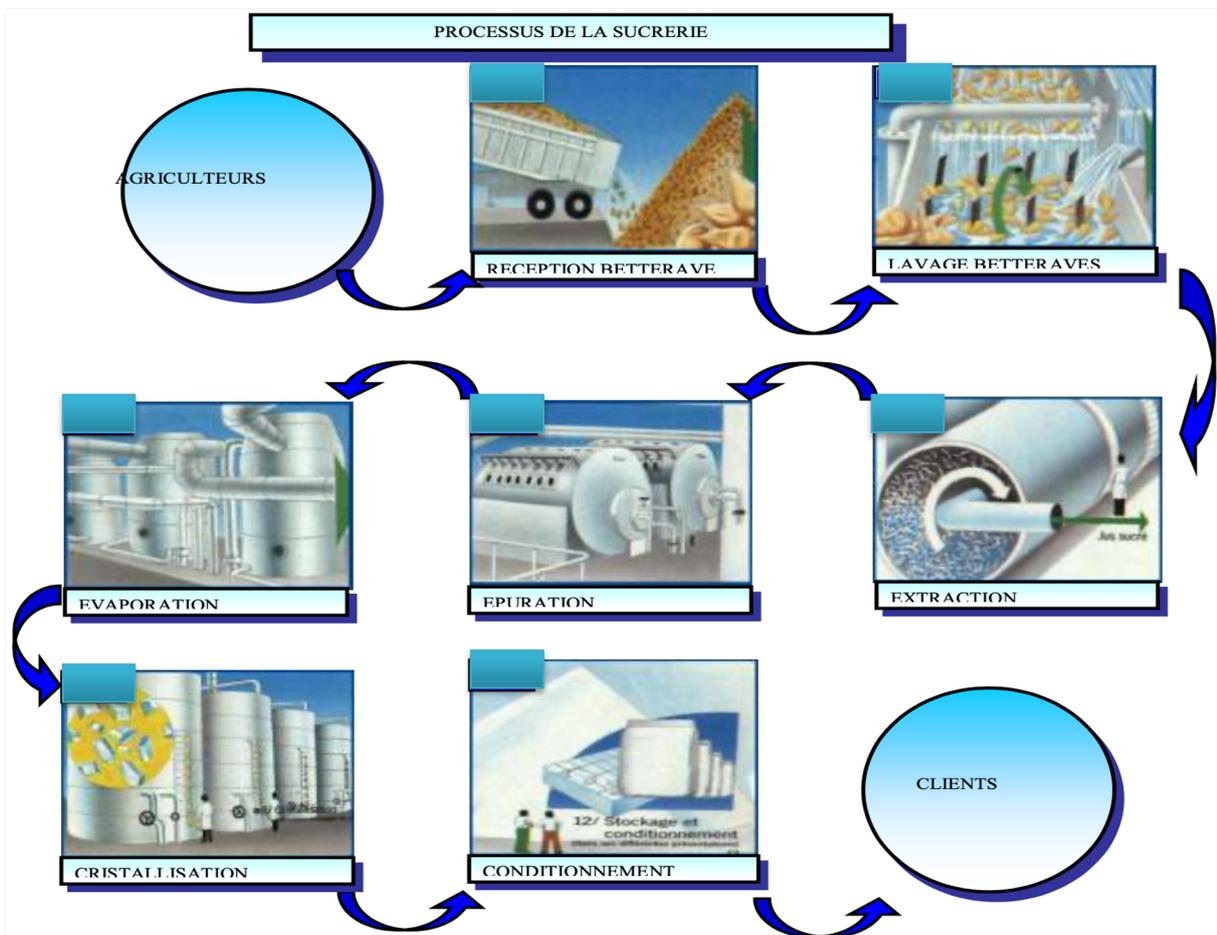


Figure 9: La pratique de la fabrication du sucre

I.2.1 Fabrication du sucre blanc :

Les différentes étapes du procédé de fabrication du sucre à partir de la betterave sucrière, sont schématisées dans la figure 10

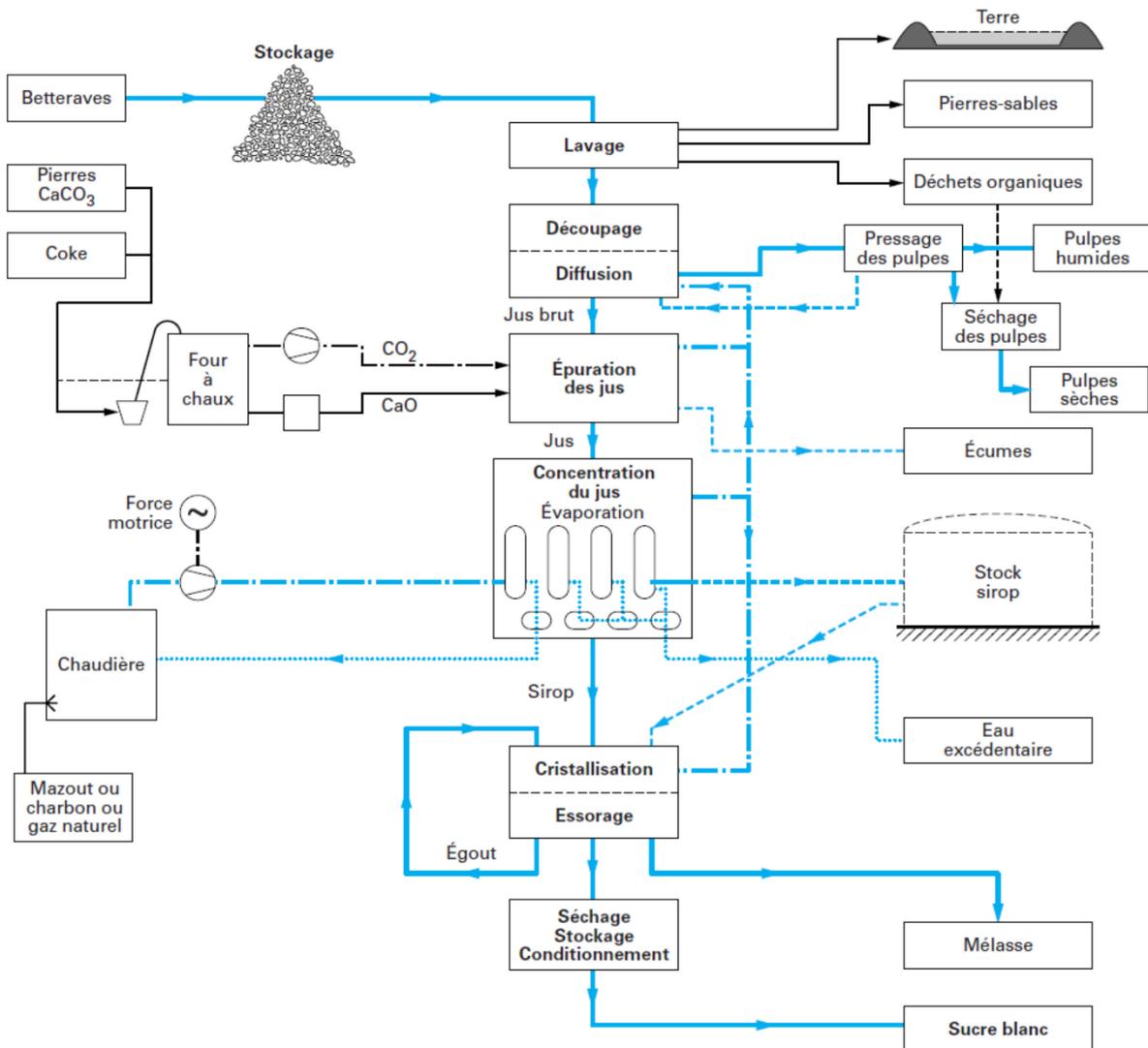


Figure 10 : Schéma des étapes du procédé de fabrication du sucre à partir de la betterave sucrière.

I.2.1.1 Réception et lavage

La réception est l'opération qui consiste à déterminer la quantité des betteraves fournies par les agriculteurs et leurs richesses (**Fig.11,12**). Les usines utilisent la « pesée directe » qui a lieu au centre de réception. Le camion, chargé de betteraves, passe sur une bascule (poids Brut) et repasse sur la même bascule à vide (poids net). L'identification de l'agriculteur et le tonnage sont enregistrés à l'aide d'un code numérique. Les betteraves sont payées en fonction:

- Du poids marchand des betteraves livrées à la sucrerie (déduction de la terre, des cailloux, des collets,...)
- De la teneur en sucre de ces betteraves.

La sucrerie n'achète, par une pesée directe, que le sucre polarisable contenu dans les betteraves nettes, selon un tarif officiel qui fixe le prix à la tonne de betterave nette à 16,5 de richesse. La tare terre et collets ainsi que la polarisation sont déterminés sur des échantillons de chaque livraison.

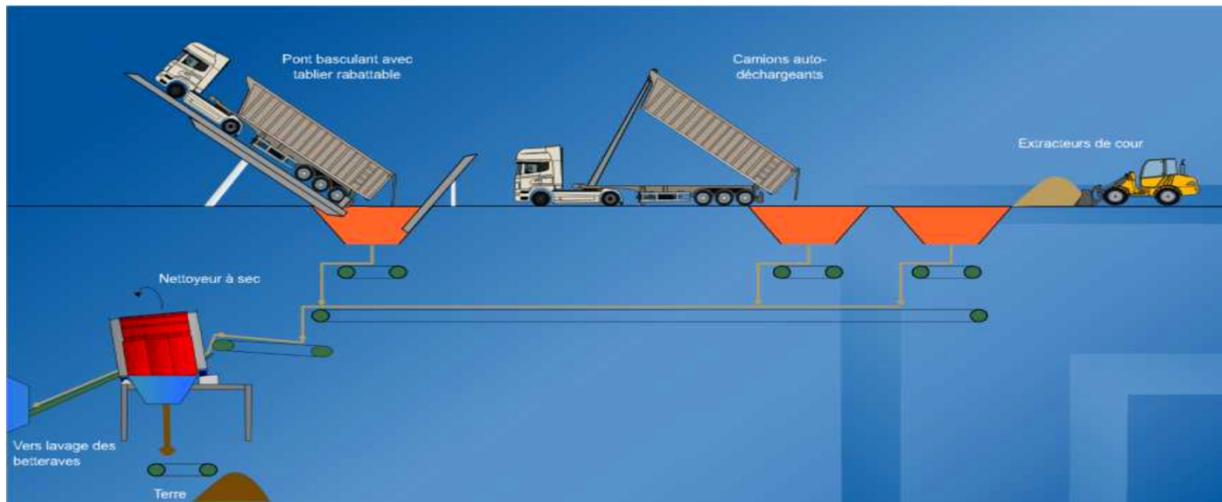


Figure 11: Cour de réception de la betterave



Figure 12: Déchargement lors de la réception de la betterave

- *Echantillonnage*

A l'aide d'une sonde, appelée « Rupro », plusieurs échantillons de betteraves sont prélevés dans le camion afin d'évaluer sur une masse représentative de 150 à 200 kg : la tare-terre et la teneur en sucre

- La tare-terre

La tare est composée majoritairement de terre, pierres ou graviers et de déchets organiques (herbes feuilles). La tare ne comprend pas les collets (partie supérieure de la racine + feuilles).

- La teneur en sucre

La proportion de sucre contenue dans la betterave, est mesurée par à un dosage sur échantillons. La mesure saccharimétrique est effectuée sur un filtrat résultant de la digestion aqueuse à froid de 40g de râpure de betteraves et d'une solution aqueuse de sous-acétate de Plomb. La richesse moyenne en sucre varie de 15 à 20 % de son poids.

a. Transport des betteraves

La qualité du sucre produit, dépend également de la qualité du stockage des betteraves après leur récolte. La betterave est une matière première périssable qui doit être traitée rapidement pour plusieurs raisons :

- Après l'arrachage, la perte de la richesse en sucre a lieu à raison de 200 à 400 g/ tonne et par jour. Cette quantité de sucre dépensé permet de couvrir les besoins caloriques du métabolisme de base de la betterave (respiration, pousse des feuilles).

- Les risques de fermentation et d'échauffement du silo induisent une plus grande difficulté d'extraction du sucre en usine.

- Les risques de gel et de dégel du silo favorisent la dégradation de la betterave facilement identifiable par une coloration noire de la racine. Ces dégradations produisent par exemple des polysaccharides tels que les dextrans ou les levanes. Ces molécules posant ensuite des difficultés au niveau des étapes de filtration ou de purification. Le gel peut également influencer la morphologie des cristaux puisque la présence de raffinose allonge le cristal de sucre lors de la cristallisation.

Afin de faire face à toutes ces difficultés, les usines sont en général implantées sur les lieux de culture (rayon moyen 25 km).

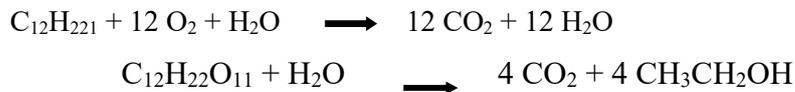
b. Stockage des betteraves

Afin d'assurer l'alimentation de l'usine pendant la nuit, rendre la fabrication indépendante du rythme des réceptions. Le stockage est de deux types :

1- En « silo », au bord des champs (tas aux dimensions spécifiques propices à l'aération naturelle). La sucrerie les fait charger suivant un ordre pré-établi avec les planteurs.

2- En usine, toujours sous forme de tas. Cette « réserve » de betteraves garantie une autonomie de 48 h à l'usine qui fonctionne ainsi jour et nuit pendant environ trois mois. Trois

types de dégradation avec une répercussion négative sur le rendement de l'usine : physique, chimique et microbiologique. Réaction de consommation du saccharose :



- *Pertes de sucre au cours du stockage*

Le temps de séjour de la betterave arrachée a un impact considérable sur sa valeur quantitative et qualitative. L'effet combiné de ces deux phénomènes conduit à une perte en sucre et une baisse de la qualité technologique de la betterave :

- Pertes en sucre : 45 Kg / T Bett
- Chute de pureté : 3 points
- Baisse du taux d'extraction : 6 points
- Prolifération des micro-organismes : de 40 millions initial à 1020 millions après 5 jours pour les levures et les moisissures suivant le lot de betterave.

Sucres réducteurs du jus de pression : de 0,18 % à 1,47 selon le lot. Ecart entre le sucre déterminé par polarisation et par voie enzymatique : jusqu'à 2,5 points. A partir d'un certain moment la betterave devient intraitable (jus de pression Pté inférieure à 82, pH inférieur à 5 etc. ...)

c. Lavage des betteraves

Le déchargement des betteraves est effectué dans une fosse appelée « point fixe » et elles sont acheminées par bande transporteuse ou voie hydraulique vers le lavoir. Les betteraves arrivant au lavoir contiennent d'importantes quantités de terre, pierres, herbes, radicules et feuilles de betteraves. La séparation a lieu en plusieurs étapes (**Fig.13**) :

- Un cylindre éboueur élimine la terre des betteraves
- Un séparateur utilisant la différence de densité permet d'éliminer les pierres et par flottation, les herbes
- Pour finir, on récupère les radicules (petits fragments de betterave)

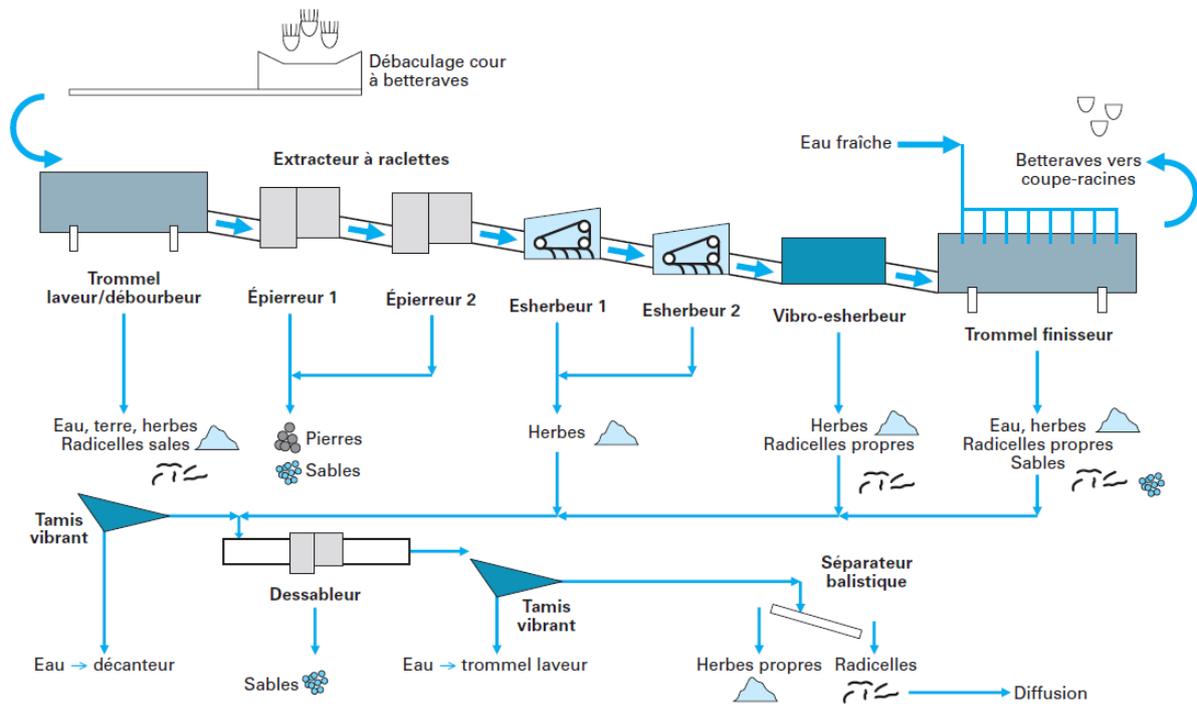
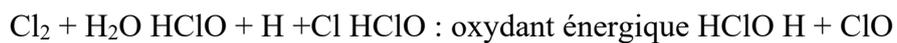


Figure 13 : Schéma simplifié de l'atelier de lavage de la betterave sucrière. Ces matières étrangères provoqueraient des difficultés de fonctionnement des machines, des fermentations et des usures. Les eaux de lavage subissent un traitement antiseptique et une correction de pH. Pour la désinfection l'eau de javel et ou le chlore sont les plus utilisés : les antiseptiques sont ajoutés dans les eaux de rinçage pour éviter leur destruction par la matière organique.



ClO : ion hypochlorite moins énergétique que l'acide hypochloreux, le ClO est vendu sous forme d'eau de javel : $\text{NaClO} \cdot 2\text{Cl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{ClH} + \frac{1}{2} \text{O}_2$ milieu oxydant.



Figure 14: Lavage de la betterave sucrière.

Les pertes de sucre dans le lavoir varient entre 0,10 et 0,15 en prenant toutes les précautions nécessaires (**Fig.14**) :

- Le pH de l'eau de lavage doit se situer entre 9,5 et 11.
- La densité de l'eau de transport doit se situer entre 1,005 à 1,015

- Valorisation des résidus de lavoir

- Les eaux contenant la terre et quelques débris sont soit, envoyées à l'épandage sur terre de cultures, soit, décantées dans des bassins puis recyclées.
- Les pierres sont lavées et réutilisées
- Les herbes et feuilles sont soit rendues à la culture, soit, séchées pour l'alimentation du bétail.

I.2.1.2 Extraction du saccharose

a. Découpage en cossettes : les betteraves propres sortant du lavoir tombent dans le coupe-racines dont les couteaux entraînés par un disque de grand diamètre découpent les racines en fines lanières assez rigides appelées « cossettes ». Les cossettes de forme « faïtière » (**Fig.15**) ont une longueur de 5 à 6 cm et une épaisseur de 0.9 à 1.3 mm, elles offrent ainsi une large surface, très favorable à l'extraction du jus par diffusion. Le sucre en solution dans le cœur sortira d'autant plus vite que la distance à parcourir pour atteindre la surface est courte. Pour faciliter la sortie, les betteraves sont coupées en fines lamelles, pour donner de plus grandes surfaces de contact avec l'eau et diminuer la distance entre le cœur et la surface

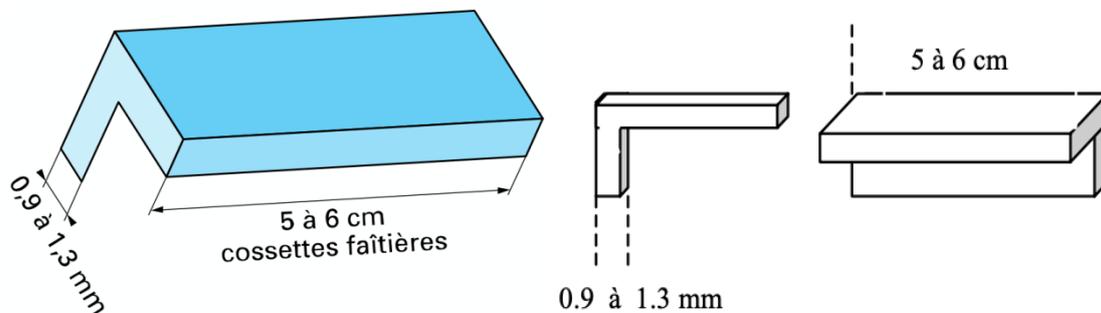


Figure 15: Schéma et forme des cossettes de forme « Faïtière »

Le découpage possède une importance capitale dans l'extraction du sucre, de sa qualité dépendent :

- Le soutirage
- L'épuisement
- La qualité du jus
- Le débit journalier

b. Extraction par diffusion : son but est d'extraire le maximum de sucre tout en extrayant un minimum de non sucres. Notamment les matières azotées et les pectines. Principe de la diffusion : Phénomène d'osmose et d'osmose inverse (**Fig.16**).

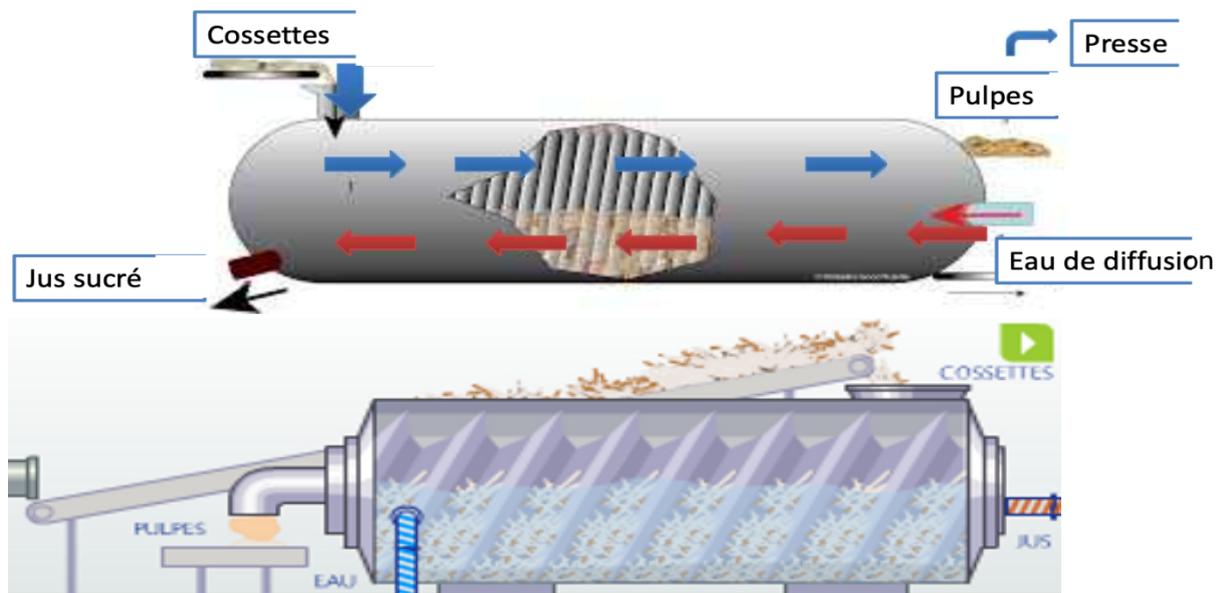


Figure 16: Schéma de l'extraction du saccharose par diffusion

- L'extraction du sucre à partir des cellules de betterave se fait par l'opération de transfert des composés solubles de la matière première vers un solvant, l'eau, il s'agit de la diffusion. Les cossettes circulent à contre-courant avec de l'eau chaude à 70-80°C afin de dénaturer la membrane ectoplasmique des cellules (**Fig.17**). La matière sèche de la racine est d'environ 25 %. Ces matières sèches comprennent 17% de paroi cellulaire insoluble ; 73% de sucre ; 10 % de matières solubles. Après dénaturation, les matières solubles du jus de la betterave passent en solution à travers la membrane cellulosique perméable selon les lois de la diffusion.

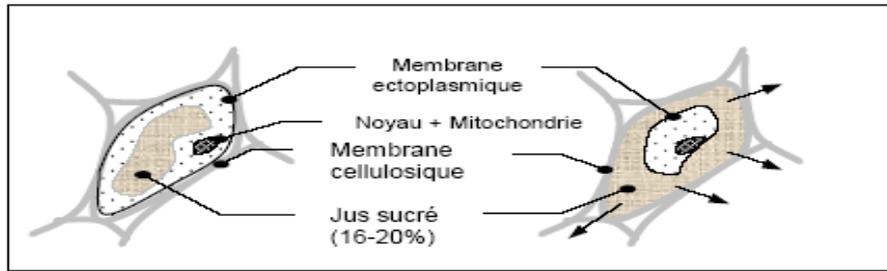


Figure 17 : Schéma d'une cellule de betterave avant et après chauffage

c. Théorie de la diffusion : La diffusion, qui est un phénomène naturel tendant à rétablir l'équilibre dès qu'il y a un gradient de concentration, obéit à la loi de Fick

$$\left(\frac{dq}{dt} = -D.S.\frac{dC}{dx} \right)$$

où :

$\frac{dq}{dt}$ est la masse de matière qui diffuse par unité de temps,
 D le coefficient de diffusion,
 S la surface à travers laquelle se fait la diffusion
 dC le gradient de concentration.

- Si la concentration à l'intérieur des cellules est C_1 , la concentration de l'eau qui entoure les cossettes, C_2 et le coefficient d'extraction (qui inclut diffusion, surface et épaisseur de cossettes), k_e , nous pouvons exprimer l'allure d'extraction (variation de concentration dans le temps) par : $\frac{dc_1}{dt} = -k_e.(C_1 - C_2)$

- L'avancement de l'extraction η_L si la concentration initiale en sucre de la betterave est C_1 et celle de l'eau d'extraction $C_{2,0}$ obtenu par intégration de l'expression ci-dessous, est :

$$\eta_L = \frac{C_1 - C_{2,0}}{C_1 - C_{2,0}} = \exp(-k_e.t)$$

d. Principe

En sucrerie, la diffusion est conduite à contre-courant. Il existe quatre types de diffuseurs : diffuseur horizontal à tube tournant (**Fig.18**), le diffuseur à tapis, le diffuseur à vis, le diffuseur à tour. Par exemple, la diffusion horizontale reçoit à l'une de ses extrémités les cossettes et à l'autre l'eau chaude nécessaire à l'extraction du sucre. Elle tourne à une vitesse

régulière. A l'intérieur, de multiples compartiments hélicoïdaux facilitent l'entraînement des cossettes et du liquide. Le liquide suit un couloir hélicoïdal fait de tôles pleines. A chaque tour du cylindre, on déverse le contenu d'eau du couloir sur les cossettes déposées (**Fig.19**) sur une tôle perforée.



Figure 18: Diffuseur horizontal à tube tournant

Le jus s'enrichit au fur et à mesure qu'il avance dans le couloir hélicoïdal. En tête de diffuseur, le jus sucré sort tandis que les cossettes épuisées sont recueillies en queue du diffuseur sous forme de pulpes (ou cossettes épuisées). Les pulpes sont pressées pour les débarrasser d'une partie de leur eau. La teneur en matières sèche passe de 7 % à 16 % (**Tab.5**)

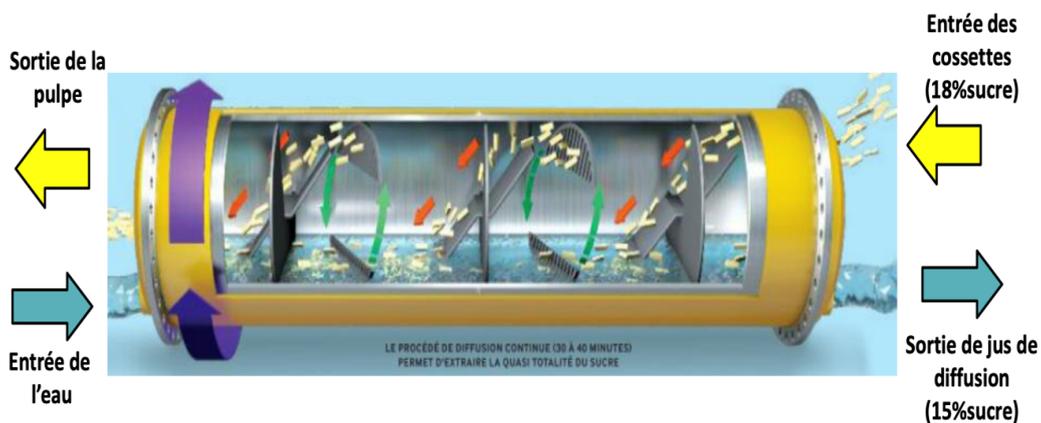


Figure 19: Schéma du procédé de diffusion basé sur le principe d'osmose

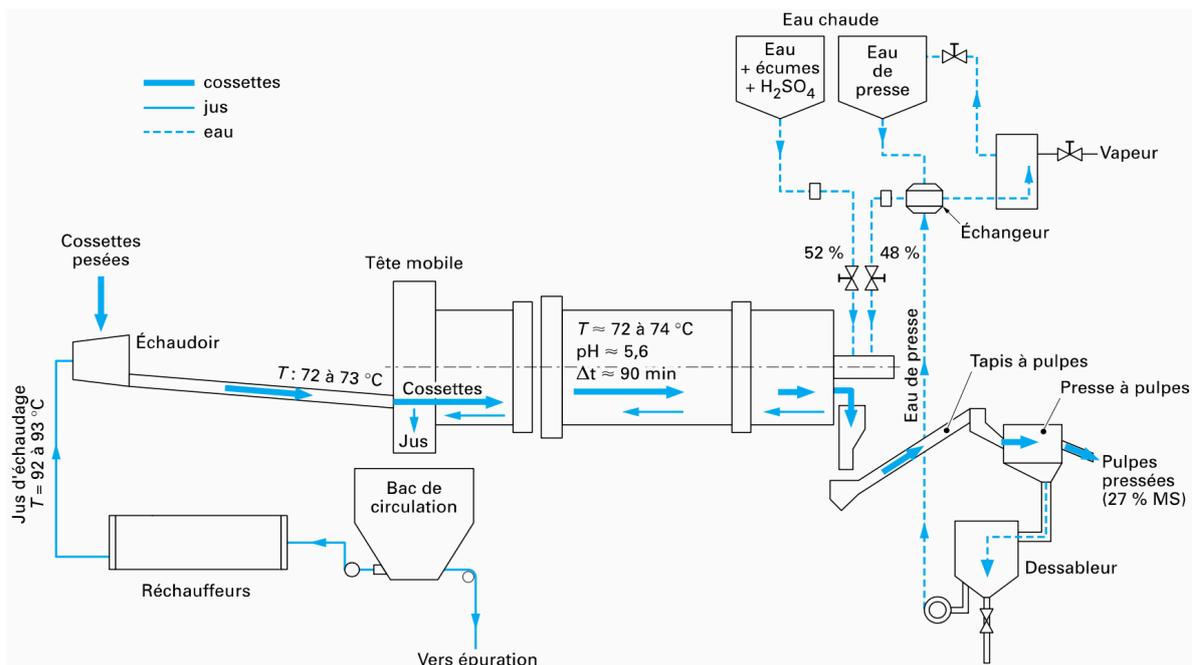
L'extraction du sucre par diffusion permet d'obtenir une solution diluée de couleur noir-grisâtre, opalescent à environ 15 % M.S, ou 15° Brix, (**Tab.5**). Ce jus acide (pH = 6) contient:

- 13 à 14 % de sucre
- 1 à 2 % d'impuretés : organiques (protéines, pectines, autres sucres, acides organiques, colloïdes) et minérales : sels de Na^+ , K, Ca, Mg, etc...
- Le reste est de l'eau.

Tableau 5: Analyse type d'une solution en sortie de diffusion

Contenu du jus	Exprimé %
Matières Sèches (M.S)	15.48
Non-Sucres(N.S)	1.62
Sucre	13.86
Eau	84.52
TOTAL	100.00

- Les différentes étapes au cours de la diffusion sont détaillées dans le schéma de la figure 20 :

**Figure 20:** Schéma des étapes au cours de la diffusion

- Les impuretés ou « non-sucres » vont être gênantes pour la suite des opérations. C'est pourquoi, il est nécessaire de procéder à l'élimination de la plus grande partie des impuretés organiques et d'une partie des impuretés minérales au cours de l'épuration et d'éliminer l'eau au cours de la phase d'évaporation.

e. Valorisation des pulpes

A la sortie de la diffusion, les pulpes contiennent environ 92 % d'eau. Ces pulpes humides, de conservation médiocre, sont généralement pressées pour extraire une partie de l'eau. Elles prennent le nom de pulpes surpressées et contiennent entre 20 et 30% de matières sèches. (Tab.6)

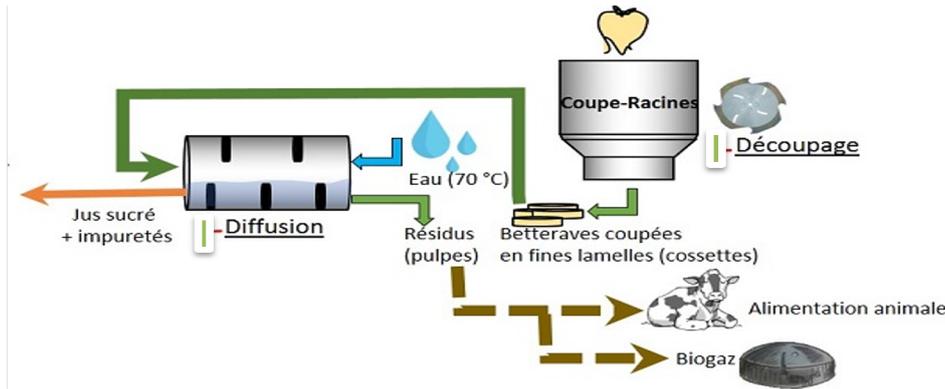


Figure 21 : Valorisation des pulpes de l'étape de diffusion des cossettes

Pour assurer une bonne conservation, elles sont ensilées ou déshydratées. L'ensilage se fait par acidification naturelle, par fermentation des bactéries lactiques. La déshydratation est obtenue par séchage, avec un taux de matières sèches final d'environ 90% ; ces pulpes sèches sont agglomérées en pellets, granulés de 8-10 mm de diamètre. D'une digestibilité élevée, riches en énergie, contenant environ 10% de matières azotées et 7% de minéraux, les pulpes conviennent bien à l'alimentation animale, en particulier aux ruminants.

I.2.1.3 Épuration

L'étape d'épuration est dite calco-carbonique, qui permet d'éliminer les produits "non-sucrés". Elle consiste en une purification chimique du jus de diffusion (**Fig.22**), ceci permet d'obtenir un jus relativement stable à haute température et dépourvu d'un certain nombre de particules indésirables qui ont pour effet d'entraver la cristallisation du sucre ; via un traitement à la chaux suivie de deux carbonatations successives

- Les sucreries fabriquent elles-mêmes les deux agents de l'épuration : chaux et dioxyde de carbone dans un four à chaux à partir de la pierre calcaire et de coke pour la combustion :



- Cette réaction dépend de la température. On atteint une décomposition complète de $CaCO_3$ à 898 °C à la pression de 1013 hPa. L'enthalpie de dissociation de $CaCO_3$ est alors de 166.64 kJ/mol, soit une quantité d'énergie requise de 2971.5 kJ/kg de CaO (ou à 25 °C, $E = 3155$ kJ/kg CaO).

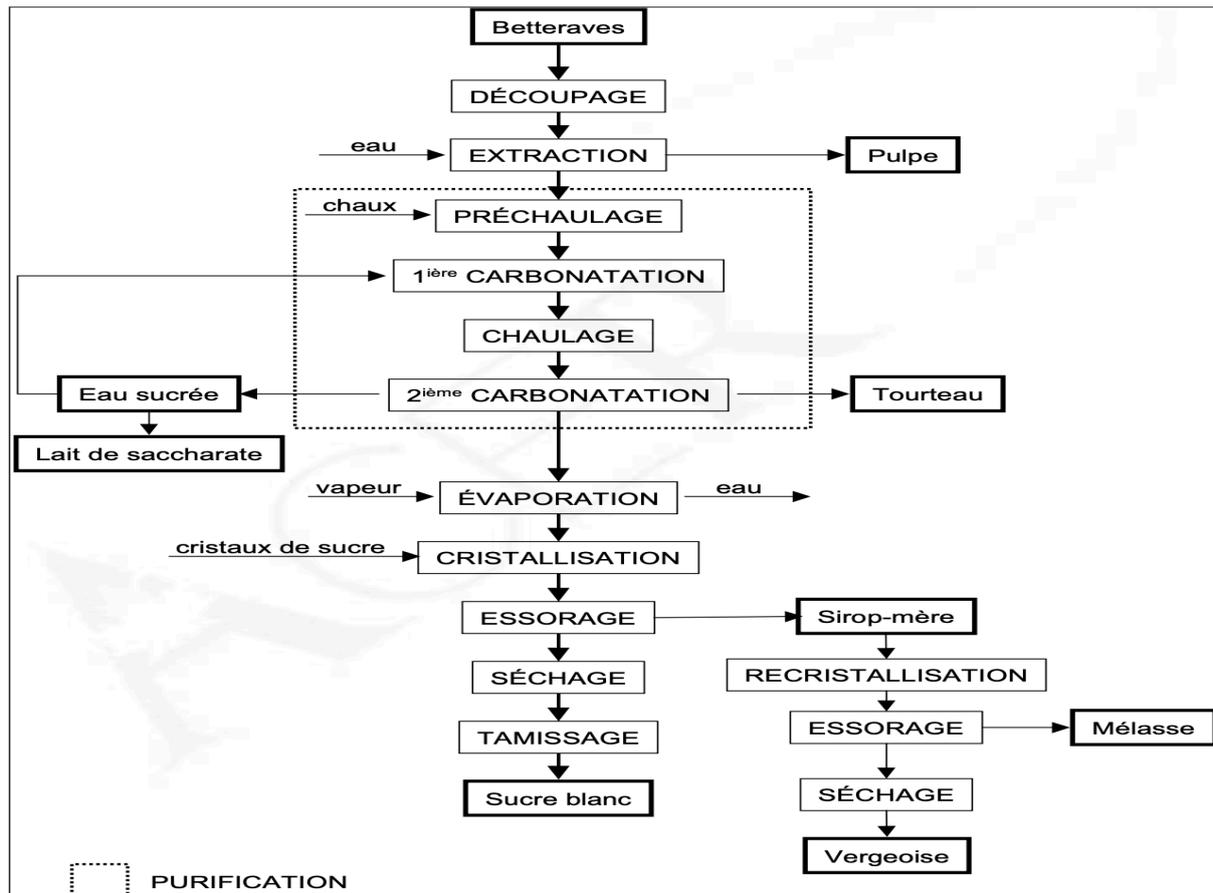


Figure 22 : Schéma des étapes d'extraction du sucre et de l'épuration calco-carbonique.

- Le lait de chaux est obtenu suivant la réaction : $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + \text{énergie}$

L'enthalpie de la réaction à 1013 hPa et 20°C est 1177,2 kJ/kg CaO. Cette réaction est très exothermique. Pour réduire la température et améliorer la dissolution, tout en abaissant la viscosité et rendant le lait de chaux facile à pomper, un procédé en deux temps : éteindre la chaux dans les condensats dans un mélange 1: à 1:5 puis dilution dans les eaux sucrées de lavage de filtre ou du jus clair.

- La purification du jus sucré comprend quatre opérations partielles fondamentales dans le procédé industriel. Elles se déroulent souvent les unes après les autres. Ces opérations sont les suivantes :

- Préchaulage, Chaulage (appelé aussi défécation), Première carbonatation, Deuxième carbonatation (**Fig.23**)

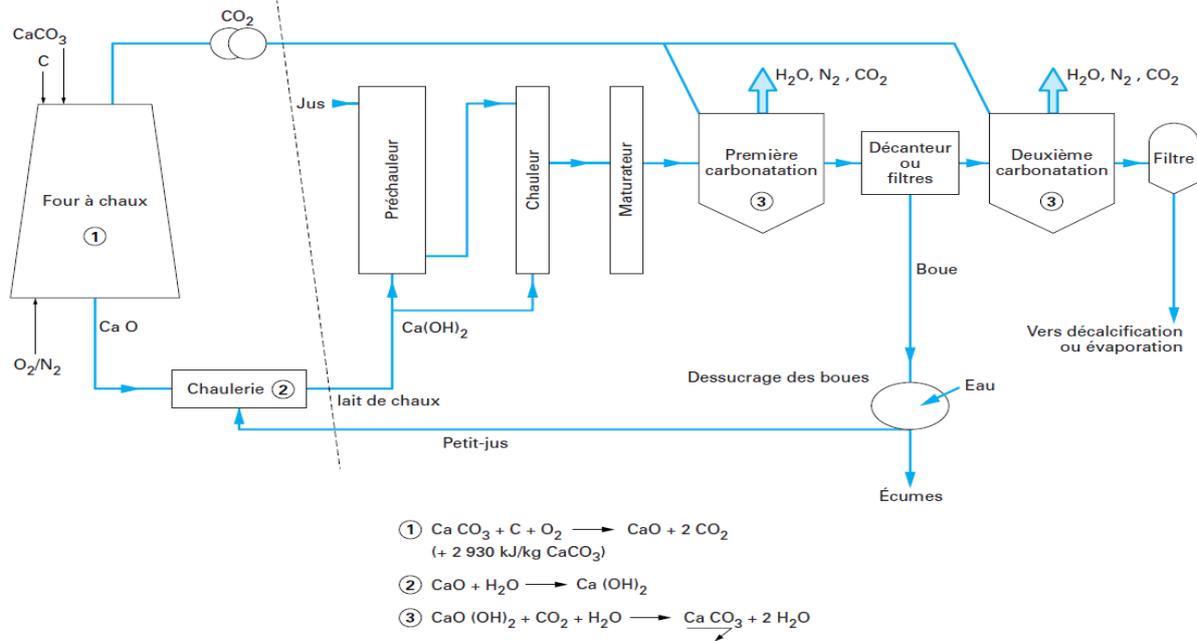


Figure 23 : Schéma du principe général de l'épuration calco-carbonique.

1.2.1.3.1 Traitement à la chaux

Le chaulage a lieu en deux temps, préchauffage et chaulage afin de réduire la quantité de chaux utilisée tout en maintenant une efficacité optimale.

a. Préchauffage

Le préchauffage correspond à une étape d'alcalinisation progressive du jus de diffusion afin de réaliser les étapes de :

- **Précipitation sélective** des impuretés telles que les acides citriques, oxalique, malique, sucre inverti, matières azotées, etc... mais également les cations 2^+ et 3^+ ou encore les anions sulfates ou phosphates. Elle est essentiellement due à la précipitation de l'ion calcium sous forme de sels insolubles. Dans le cas de l'oxalate, par exemple :



L'ion OH^- participe également à la précipitation de certains minéraux en formant des hydroxydes ; $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, etc...

- **Coagulation – floculation** des protéines, saponines ou colorants polyphénoliques, etc... Les réactions mises en jeu lors de la floculation sont complexes et encore mal définies. La conception compartimentée du préchauffeur permet de garantir cette alcalinité progressive. Les paramètres du préchauffage sont les suivants :

- Alcalinité finale : 2.5 g CaO / L

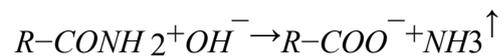
- Température : 70-75°C (certains procédés à 40 –45 °C)
- pH final de 11.5
- Temps de séjour : 10 à 15 minutes minimum

Le préchauffage correspond à environ 1/5 de l'ajout total en chaux. On recycle au préchauffage une partie des boues précipitées en 1^{ère} carbonatation et en 2^{ème} carbonatation pour améliorer la filtration et la sédimentation.

b. Le chaulage massif

Après le préchauffage, le jus passe dans un réchauffeur et est envoyé dans les bacs de chaulage à 85°C où le reste du lait de chaux est ajouté de façon massive. Le chaulage massif porte l'alcalinité totale entre 10 et 15 g CaO /L, elle assure les réactions de dégradation et notamment, la dégradation des substances azotées et des sucres réducteurs.

- La dégradation des amides et amines, conduira au dégagement d'ammoniac et à un sel de calcium insoluble : (cas de l'aspartate)



- La dégradation des sucres réducteurs conduit à des colorants, les PDAH (produits de dégradation alcaline des hexoses) et à l'acide lactique.

c) Carbonatation

Cette étape provoque d'une part la précipitation de la chaux excédentaire sous forme de carbonate de calcium, support d'adsorption des impuretés et, d'autre part, permet de neutraliser le milieu. Cette étape est suivie de décantation et de filtration pour éliminer le carbonate de calcium et les matières colorées adsorbées.

1^{ère} Carbonatation – Filtration

La première carbonatation sert à précipiter la chaux en excès dans le jus (0.08 à 0.1 % de CaO libre) sous forme de CaCO₃. Sur les cristaux de carbonate naissants, les matières colorantes PDAH vont s'adsorber et plus particulièrement les colorants provenant de la décomposition du sucre inverti. Pratiquement, le jus chaulé est réchauffé puis mis en présence d'un barbotage de dioxyde de carbone (produit par le four à chaux) selon la réaction :



L'émission d'énergie favorise la vaporisation d'une partie de l'eau contenue dans le jus. Elle est par conséquent réalisée dans des « chaudières » à carbonater. Pour éviter la redissolution des impuretés, on laisse au jus une légère alcalinité excédentaire correspondant à un pH de

11,2. Logiquement, le pH de 1^{ère} carbonatation ne devrait pas descendre en dessous de celui du préchauffage (maximum de floculation).

- Filtration ou sédimentation

La filtration a pour but :

- D'obtenir un jus clair de 1^{er} carbonatation (JC1) en retenant dans le filtre les impuretés précipitées par la chaux et adsorbées sur le carbonate de calcium.
- De laver à l'eau le dépôt retenu par la filtration (tourteau ou écumes) pour en récupérer le jus sucré dont il est imprégné, dit « petit jus ». Il est ensuite utilisé pour dissoudre la chaux vive et former le lait de chaux. Les écumes sont utilisées comme engrais.

La séparation des impuretés précipitées et du carbonate de calcium peut se faire dans des décanteurs épaisseurs sous l'effet de la pesanteur. On ajoute des flocculants pour améliorer la précipitation.

2^{ème} Carbonatation - Filtration

Après réchauffage du jus (95°C), une deuxième carbonatation est appliquée, opération analogue à la première, afin de précipiter la chaux encore présente dans ce jus clair (JC1) (Tab.7). Le pH final est d'environ 9,2 pour une alcalinité de 0,15 g CaO/L.

Tableau 7: Réactions mises en jeu lors de la 2^{ème} carbonatation

<p>Formation de l'acide carbonique $CO_2 + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$ $HCO_3^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + H^+$</p>
<p>Action sur la chaux $Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$</p>
<p>Action sur les alcalis $2KOH + H_2CO_3 \rightarrow K_2CO_3 + 2H_2O$</p>
<p>Action sur les sels de calcium $Ca(R-COO)_2 + K_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2R-COOK$</p>
<p>Formation de Bicarbonates (pH < 9.2) $CaCO_3 + H_2CO_3 \rightarrow Ca(HCO_3)_2$</p>

- Après la 1^{ère} carbonatation, environ 50 % de l'acide carbonique est sous forme de carbonate (CO_3^{2-}) alors qu'en 2^{ème} carbonatation seuls 2 % le sont. La concentration en CO_3^{2-} détermine la solubilité du carbonate de calcium en 2^{ème} carbonatation. Elle doit être suffisamment élevée pour permettre une décalcification correcte. Il doit rester suffisamment de contre ions alcalins avec le CO_3^{2-} car avec Ca^{2+} , il y a précipitation. Avant d'être envoyé

dans l'atelier de concentration, le jus épuré est généralement décalcifié et décoloré afin d'éviter l'entartrage des tubes de l'évaporateur.

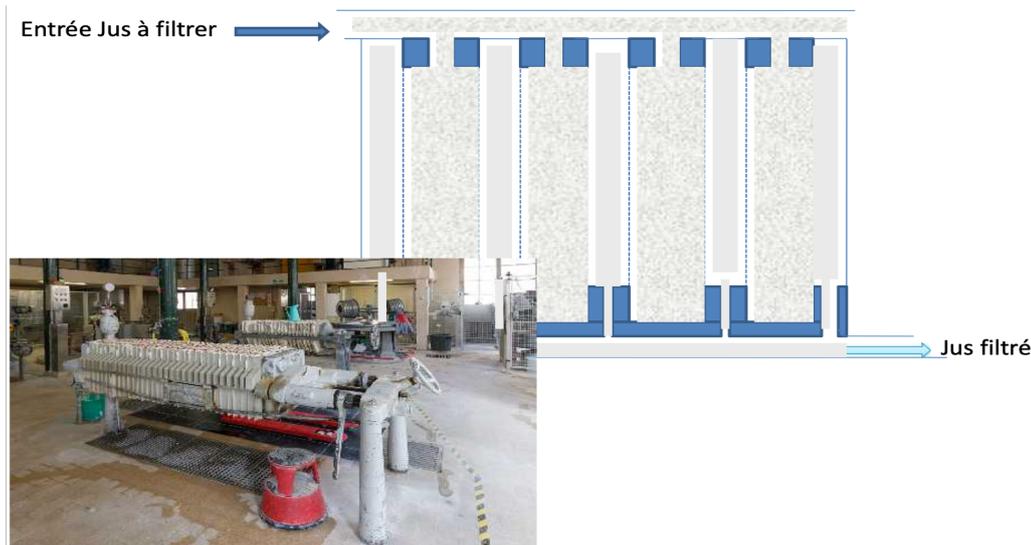
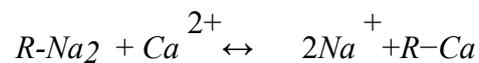


Figure 24 : Filtration du jus en sucrerie

- La décalcification consiste à faire passer le jus sur des résines échangeuses d'anions (Sodium contre calcium) suivant la réaction :



La régénération des résines a lieu selon trois protocoles possibles : le procédé à la saumure, le procédé à la soude, ou le procédé à l'égout pauvre de 2^{ème} jet (EP2)

- La décoloration a lieu sur le jus clair avant évaporation (JAE) par ajout de SO₂ qui joue le rôle d'inhibiteur de coloration par fixation sur les liaisons carbonyles des sucres réducteurs. Cette étape empêche la formation des colorants principaux : PDAH et mélanoidines. Une légère dilution du jus de diffusion a lieu. Si on reprend l'analyse moyenne du jus de diffusion, on obtient les données du tableau ci-après :

Tableau 7: Analyse type d'une solution après épuration calco-carbonique.

Contenu du jus	Exprimé %
Matières Sèches (M.S.)	14,94
Non-sucre (N.S.)	1,08
Sucre	13,86
Eau	85,06
Total	100,00

A l'issue de cette seconde carbonatation, environ 1/3 des impuretés est éliminée

I.2.1.4 Évaporation

Le jus filtré ou jus clair, contient environ 14% de sucre, 1% de non sucres et 85% d'eau. L'étape de concentration a lieu dans un évaporateur à multiples effets. A part le 1er effet qui reçoit la vapeur vive, les autres chaudières sont réchauffées par les buées d'évaporation de l'effet précédent. Le jus entrant est porté à 130 °C puis la température décroît progressivement pour atteindre 85 °C. En fin d'évaporation, le jus devient concentré (appelé sirop vierge) et contient environ 65 à 70% de matière sèche. Cet atelier représente le cœur de la sucrerie, puisque les quantités d'eau à éliminer sont si importantes que la vapeur produite permet de générer de l'énergie utile à la fois à l'évaporateur (auto- alimentation) mais aussi au fonctionnement de l'usine. Seul le 1er effet utilise de la vapeur vive produite dans une chaudière à fuel ou gaz et ramenée à 3 bars après passage dans un turbo alternateur qui génère l'électricité nécessaire à l'usine. La chaufferie de l'usine ou les machines à vapeur alimentent la première chaudière, et la vapeur dégagée par le jus alimente à son tour la 2^{ème} chaudière...etc. Le dernier corps est relié à une pompe à vide qui permet d'abaisser la pression de caisse en caisse, la dernière étant sous vide.



Figure 25 : Système d'évaporation en sucrerie

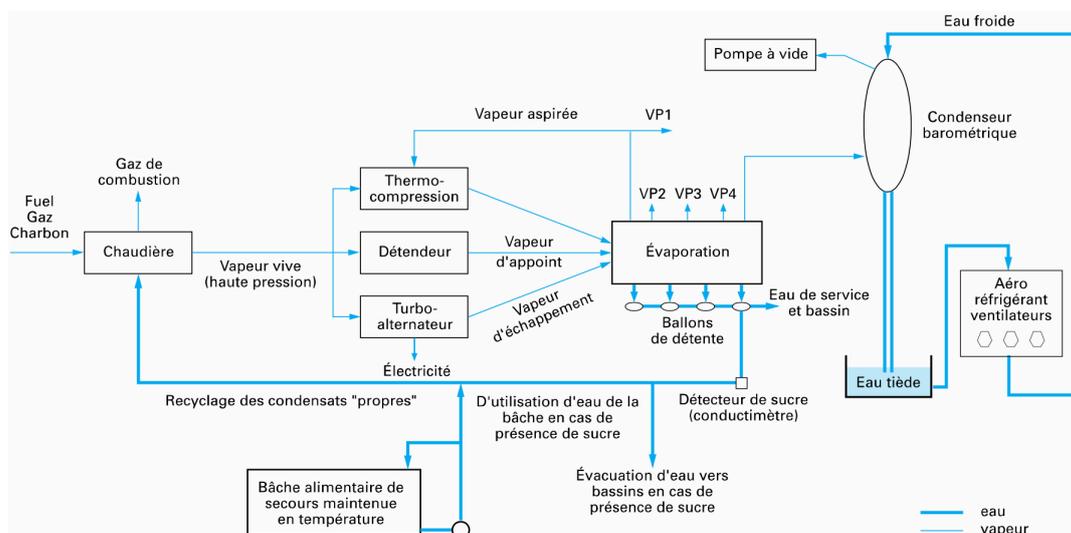


Figure 26: Schéma des étapes d'évaporation du jus sucré épuré.

I.2.1.4.1. Théorie

Le facteur primordial dans le transfert de chaleur qui a lieu dans un évaporateur est la différence de température entre le milieu chauffant (généralement la vapeur d'eau) et le liquide chauffé. La température de ce dernier est influencée par la pression, l'élévation de son point d'ébullition ou encore la charge hydrostatique.

- La quantité de chaleur transférée (Q) par unité de temps est donnée par la formule :

$$Q = K \times A \times \Delta\theta$$

Avec K Coefficient global d'échange (kJ/h.m².°C)
 A Surface de l'échangeur (m²)
 Δθ Différence de température (milieu chauffant-liquide chauffé)

I.2.1.4.2. Choix des conditions d'évaporation

a- Contrôle de la pression :

La pression est abaissée d'effet en effet, le dernier étant sous vide, afin de limiter l'élévation du point d'ébullition du sirop et de compenser l'augmentation de la viscosité du sirop. En effet, plus une solution est concentrée et plus le point d'ébullition est élevé. Par conséquent, au cours de l'évaporation multiple-effet, l'écart de température Δθ est réduit ainsi que le transfert de chaleur. Ceci est compensé par le contrôle de l'écart de pression entre chacun des effets.

b- Contrôle du circuit des condensats :

Afin d'améliorer le rendement calorifique global de l'usine, la vapeur est prélevée dans chaque effet et redistribuée. Pour éviter tout risque de « coup de sucre » (sucre dans l'eau) dans la chaudière, une mesure en ligne de la conductivité permet de dévier l'eau si nécessaire et de préserver l'installation. La sucrerie est une industrie auto-suffisante en eau et en énergie. L'eau provenant de la betterave est recyclée sous forme d'eau de presses en diffusion. L'eau condensée après évaporation est recyclée en chaudière vapeur. De même les multiples prélèvements de vapeur de l'évaporation et de la cristallisation permettent les réchauffages des jus et autres produits à tous les stades de la fabrication. La recherche sucrière a été très active dans le domaine des économies d'énergie. Une diminution à des niveaux de consommation de l'ordre de 17 kg vapeur/100kg de betterave et 3.1 kWh/ 100 kg de betteraves pour l'électricité. - Une partie de ce jus concentré (sirop vierge) est dirigée ensuite vers les cuites pour l'étape de la cristallisation, alors que le reste est stocké dans des conditions de conservation appropriée pour être repris au cours d'une mini campagne et cristallisé.

I.2.1.4.3. Chaudières

En sucrerie, ce sont principalement des chaudières à tubes d'eau (l'eau circule et se vaporise dans les tubes situés autour de la chambre de combustion) de timbrage entre 25 à 50 bar car au-delà de 60 bar, les contraintes sont trop fortes. En effet, plus le timbrage d'une chaudière est élevé, meilleur est le rendement énergétique, mais l'investissement est plus lourd et les précautions à prendre plus contraignantes, notamment concernant la qualité de l'eau. L'eau de chaudière en sucrerie suit un circuit pratiquement fermé puisque la vapeur condensée est recyclée en chaudière (Fig.27). Toutefois il peut entrer de l'eau nouvelle appelée « eau de bêche » ou « eau d'appoint » pour compenser les pertes. On peut également retirer de l'eau en réalisant des purges, notamment au niveau de la chaudière pour maintenir la qualité de l'eau.

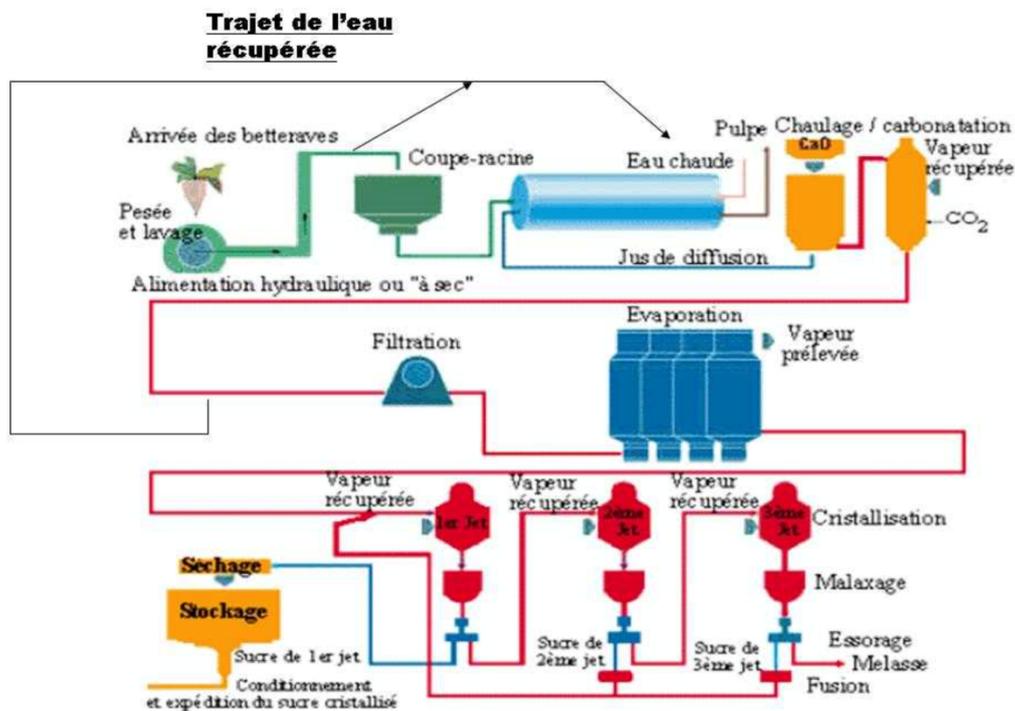


Figure 27: Circuit de l'eau lors de la fabrication du sucre.

I.2.1.5 Cristallisation

Cette étape est la phase ultime de purification du sucre. Elle permet de séparer les impuretés contenues dans le sirop. Cette opération est réalisée à l'inverse de l'épuration calco-carbonique, puisqu'on élimine le saccharose sous forme de cristaux (Fig.28) alors que les impuretés restent concentrées dans le liquide pour donner en final une solution résiduelle épuisée : *la mélasse*. A la fin de l'évaporation le sirop de sucre se trouve dans les conditions suivantes :

- Brix=65%
- Sucre = 60.5 %
- Pureté = 93 %

Dans ces conditions, le sucre ne peut pas cristalliser. Pour cristalliser, il faut atteindre une sursaturation nécessaire à l'apparition de germes cristallins et/ou à la croissance des cristaux existants.



Figure 28 : Système de cristallisation en sucrerie

La cristallisation est généralement effectuée en trois étapes appelées « jets » (Fig.29).

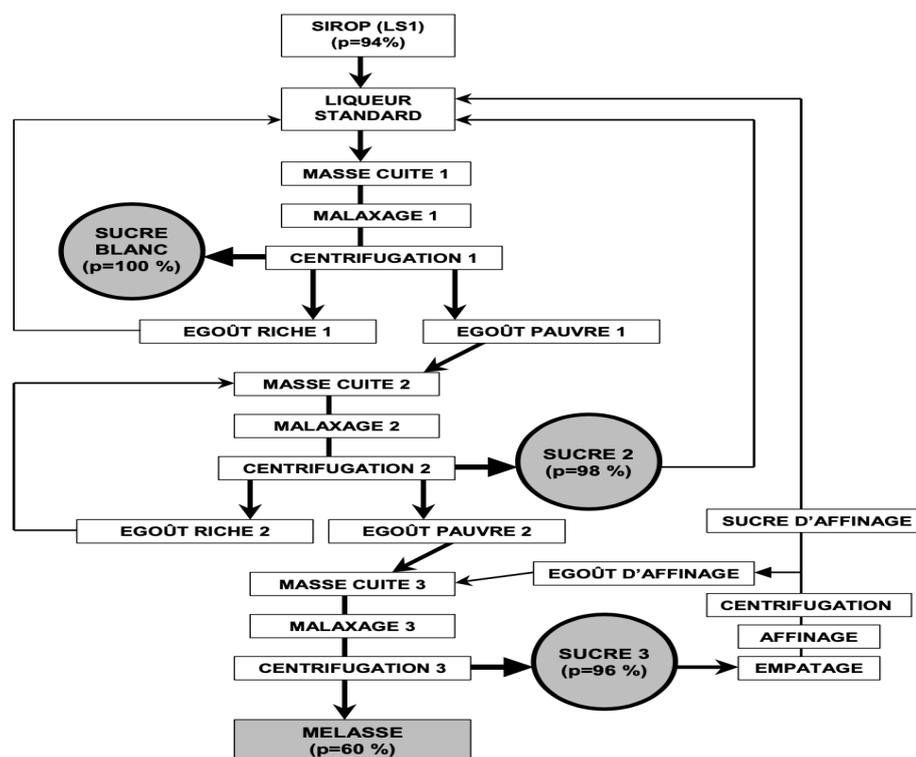


Figure 29 : Les étapes de la cristallisation

Chaque jet comprend lui-même trois étapes principales, la cuisson, le malaxage et l'essorage. La solution appelée « liqueur standard » alimentant chaque jet de cristallisation est le résultat du mélange de différents produits. Dès que y'a présence de cristaux en suspension dans un sirop, on parle de « masse cuite » et le sirop prend le nom « d'eau- mère » car c'est lui qui nourrit le cristal. Lors de l'essorage de la masse cuite pour séparer les cristaux, l'eau-mère est

évacuée et prend le nom « d'égout pauvre ». Puis la surface des cristaux est lavée par pulvérisation d'eau, on parle de «clairçage». Cette étape entraîne une légère redissolution de sucre cristallisé et le sirop issu du lavage est donc nettement plus pur que le précédent égout, d'où son nom «d'égout riche»

a- Cuisson

- **Phase de concentration** : Le sirop est concentré et agité dans de grandes chaudières dites « cuites » fonctionnant sous vide partiel. La concentration de la liqueur standard (pied de cuite) est réalisée par évaporation jusqu'à atteindre la zone métastable. Cette zone est variable selon le jet considéré. Pour le 1er jet, la sursaturation est comprise entre 1,0 et 1,1 et entre 1,0 et 1,25 en deuxième et troisième jets.
- **Grainage** : Pour maîtriser la taille des cristaux obtenus, il est nécessaire de contrôler le nombre de cristaux formés. Ceci est réalisé par un ensemencement de fins cristaux dans le sirop sursaturé en zone métastable, il s'agit du « grainage ». En théorie, le nombre de cristaux de semence est le même que celui à la fin de la cristallisation. Les cristaux n'ont fait que grossir. Lorsque la sursaturation atteint 1,15, le grainage est provoqué par introduction d'une quantité de sucre broyé bien calibré dispersés dans de l'alcool isopropylique. Ce grainage est suivi d'une période dite de maturation (maintien des conditions de sursaturation) qui dure 2 à 3 minutes afin de permettre la réorganisation de la masse cuite.
- **Montée de la cuite** : A mesure que les cristaux grossissent dans la masse cuite, la sursaturation de l'eau mère diminue. Pour maintenir une sursaturation constante, on alimente en sirop tout en évaporant sous vide.
- **Le serrage** : Lorsque la vitesse de cristallisation chute et que la chaudière est pleine, c'est la phase de serrage de la cuite. L'alimentation en sirop est stoppée et l'évaporation d'eau est poursuivie. Cette phase finale de cuisson permet d'évaporer l'eau excédentaire et améliore le rendement en cristaux car il épuise l'eau mère.
 - **Coulage et lavage de la cuite** : Lorsque la cuite est vidangée, de l'eau chaude ou de la vapeur est pulvérisée sur les faisceaux de l'échangeur de chaleur afin de nettoyer l'appareil.

L'ensemble du cycle de la cristallisation dure entre 2h00 et 5h selon la taille des cristaux formés et la pureté de la masse cuite.

b- Malaxage

La masse cuite dont la température avoisine 75 à 85 °C à la sortie de la cuite est déversée dans un bac de malaxage qui permet une agitation régulière. Durant cette période (30 min à 1h), la masse cuite refroidit et les cristaux achèvent leur grossissement. Une addition d'eau ou d'égout est effectuée pour dissoudre les fines qu'un refroidissement rapide risque de former.

c- Essorage

La masse cuite est enfin alimentée dans des centrifugeuses ou turbines ayant différentes phases de fonctionnement :

Remplissage de la turbine à faible vitesse de rotation (200 tr/min) afin d'obtenir une répartition homogène sur le tamis. Un palpeur détermine l'épaisseur maximale, soit 14 à 18 cm. Le turbinage s'accélère à 1500 tr/min afin d'évacuer l'eau mère entourant les cristaux (égout pauvre). L'essoreuse termine son cycle par un freinage électrique puis mécanique à 200 t/min et le sucre tombe sur un tapis vibrant grâce à un racleur, sa teneur en eau est inférieure à 1 %.

d- Le clairçage par ajout d'eau chaude puis de vapeur permet de laver et enfin de sécher les cristaux, le sirop recueilli étant de grande pureté constitue l'égout riche.

Rappels et définitions■ **Brix :**

$$B_x = \frac{m_{MS}}{m_{totale}} \times 100$$

avec m_{MS} masse de matière sèche,
 m_{totale} masse totale de produit.

■ **Pureté :**

$$P = \frac{m_S}{m_{MS}} \times 100$$

avec m_S masse de saccharose,
 m_{MS} masse de matière sèche.

■ **Saturation** (solubilité à saturation) exprimée en % :

$$\frac{m_S}{m_E} \times 100$$

avec m_S masse de saccharose,
 m_E masse d'eau.

On peut donc déduire la saturation du brix et de la pureté à saturation :

$$\frac{m_S}{m_E} \times 100 = \frac{1}{\frac{1}{B_{x_{sat}}} - \frac{1}{P_{sat}}}$$

I.2.1.5.1 Valorisation des mélasses

Le sucre cesse de cristalliser parce que la viscosité augmente lorsqu'on diminue la pureté. Cela empêche les molécules de se déplacer et de se déposer sur la surface du cristal. Par ailleurs chacun des composés chimiques dissous dans la mélasse va séquestrer une partie du sucre et l'empêcher de cristalliser. Ainsi, l'effet mélassigène est appelé l'effet des non-sucre sur la solubilité du sucre.

La mélasse contient environ la moitié de son poids en sucre. Les principales utilisations sont :

- Production d'alcool.
- Après fermentation suivie d'une distillation, la mélasse laisse un ultime résidu : la vinasse, riche en azote, qui est utilisé comme fertilisant sur les terres agricoles ou pour l'alimentation du bétail après déshydratation.
- Pour la fabrication d'aliments pour le bétail. La mélasse contient des sels de potasse, diverses matières organiques et azotées, et en particulier la bêtaïne qui est un précieux élément pour rééquilibrer l'alimentation animale.
- Production de levures de boulangeries
- Pour diverses fermentations industrielles (production d'acide glutamique, d'acide citrique, d'antibiotiques, etc...)

I.2.1.6 Séchage, conditionnement et stockage du sucre :

Le sucre cristallisé blanc est évacué du fond de la turbine sur un transporteur à secousses. Encore chaud (45-60°C) et humide (1%), le sucre est séché par de l'air chaud dans des cylindres, séchoirs rotatifs ou en lits fluidisés, puis refroidi afin d'atteindre une teneur en eau comprise entre 0.03 et 0.06% (**Fig.30**).

Le sucre à la sortie des essoreuses ne peut être stocké en l'état car il est entouré d'une pellicule de sirop saturé. Il doit être tout d'abord séché. L'importance du séchage et le mode de stockage sont directement liés aux conditions d'équilibre du saccharose. Il est de ce fait important de considérer l'isotherme d'adsorption du sucre. Les sécheurs à tambours sont le plus souvent utilisés. Le sucre circule à contre-courant de l'air chaud (à 50°C) et à contre-courant de l'air froid. Ce n'est pas tant le bilan thermique qui oblige à chauffer l'air, que le bilan hydrique (capacité d'absorption d'eau par l'air). Il faut que le contact air/sucre soit le meilleur possible. Même après séchage, le sucre n'est pas dans un état d'équilibre.

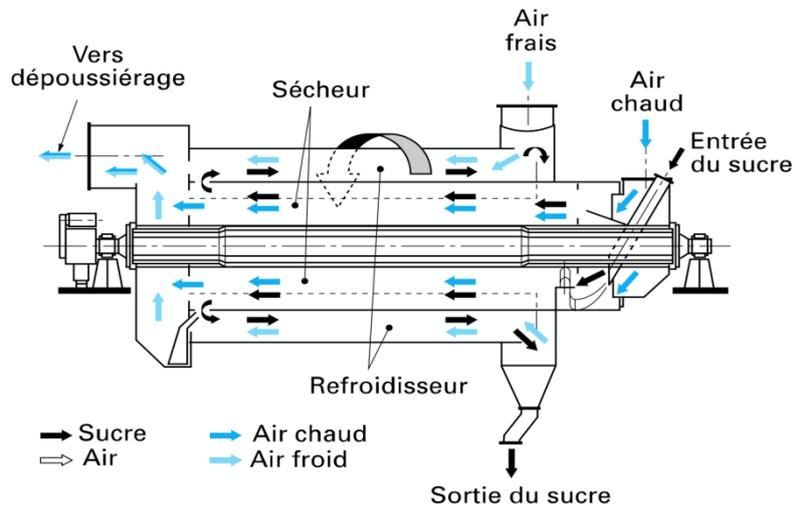


Figure 30 : Atelier de séchage

Une fois séché, le sucre est tamisé, classé et pesé, puis conditionné dans différents emballages, soit en poudre, soit en morceaux après humidification et moulage, soit dirigé vers le silo de stockage où il est conservé ou expédié en vrac. (Fig.31).



Figure 31 : Stockage du sucre

I.3. Sucre de canne

Le processus de fabrication du sucre de canne et la comparaison avec celui de la betterave sont résumés dans la figure 32 et 33.

Les co-produits issus de l'industrie sucrière sont illustrés dans la figure 34

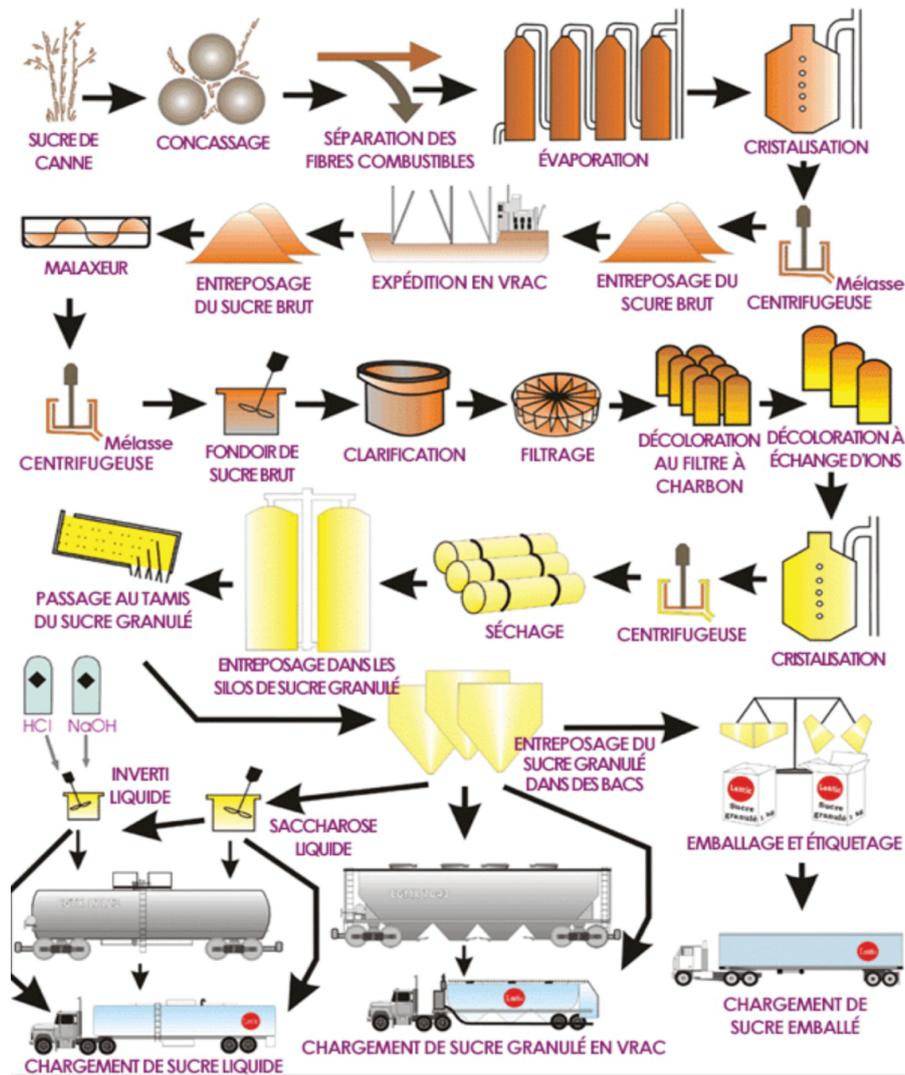


Figure 32 : Du sucre de canne en sucre granulé

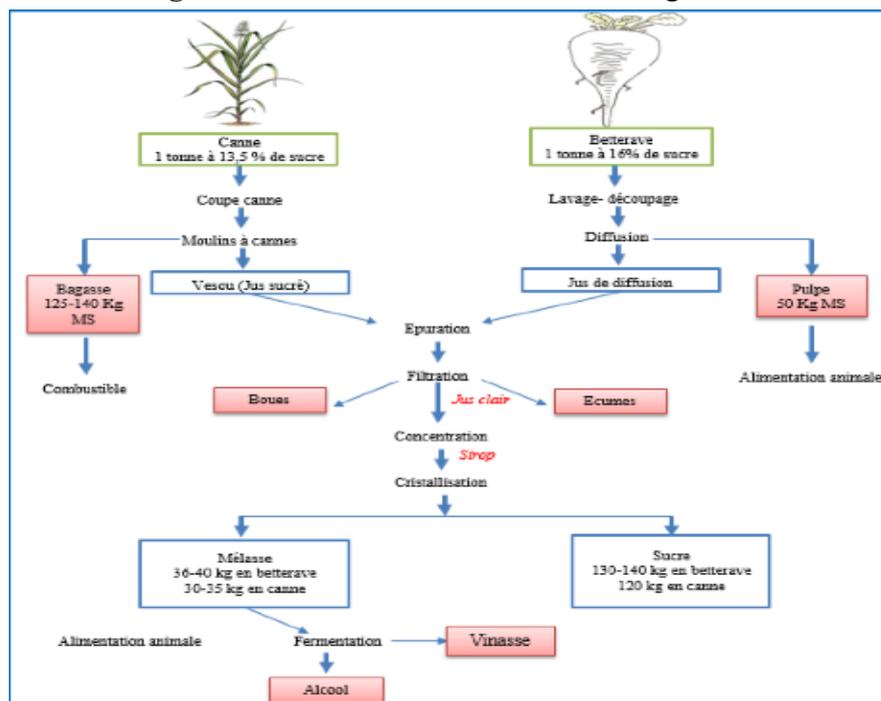


Figure 33. Comparaison du processus de fabrication du sucre

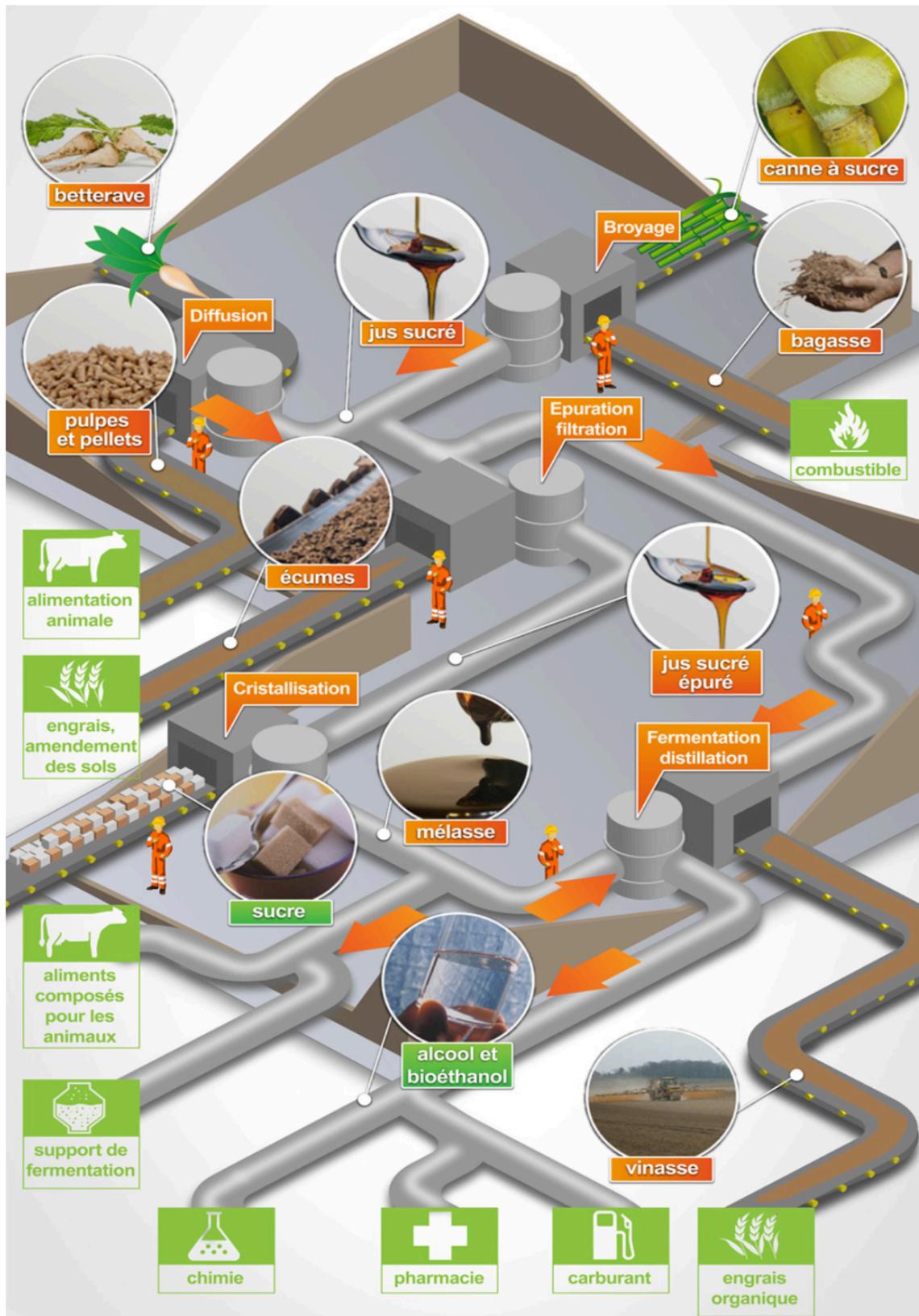


Figure 34. Les co-produits en sucrerie

Chapitre II : Technologie des fruits et légumes

Introduction :

Les fruits et légumes sont souvent indissociables ou complémentaires à plusieurs titres. Dans les deux cas, il s'agit d'un matériel végétal à forte teneur en eau, donc particulièrement biodégradable sous l'action conjuguée des insectes, des moisissures, des multi-systèmes enzymatiques et des températures élevées.

Complémentaires, les fruits et légumes le sont également au plan nutritionnel, car ils constituent un supplément indispensable des régimes de base composés de céréales et féculents relativement pauvres en vitamines et en sels minéraux divers.

Inséparables, les fruits et légumes le sont d'autre part très souvent en matière de transformation, non seulement du fait de la similitude des traitements technologiques qu'ils subissent et des équipements nécessaires à la transformation, mais également par la possibilité qu'offrent leurs calendriers respectifs de récolte de maintenir une conservation en activité durant toute l'année avec les avantages économiques que cela comporte.

II.1. Catégories de fruits et légumes

II.1.1 Catégories de fruits

Le fruit est le produit comestible de certains végétaux, de saveur généralement sucrée, et issu du développement de l'ovaire à la suite de la fécondation des ovules. Les différentes catégories de fruits sont résumées dans le tableau suivant.

II.1.2 Catégories de légumes

Le légume est une plante cultivée dont on consomme, selon les espèces, les feuilles, les tiges, les racines, les tubercules, les fruits, les graines. Les différentes catégories, indiquées dans le tableau 8 et 9, sont définies en fonction de l'organe ou du fragment végétal utilisé comme légumes. Souvent assimilées comme légumes, les légumineuses ont également été traitées dans ce cours.

Tableau 8 : les différentes catégories de fruits

Fruits rouges ou baies	Fraise, framboise, cassis, groseille, mûre et myrtille
Fruits à noyau	Pêche, abricot, cerise, prune et olive
Fruits à pépin	Pomme, poire, raisin et kiwi
Fruits a coque	Noix, amande et noisette
Fruits méditerranéens et tropicaux	Citron, agrumes (pamplemousse, clémentine, orange), avocat, banane, ananas, mangue, papaye, datte, grenade et goyave

Tableau 9 : les différentes catégories de légumes.

Légumes feuilles	
- entières	Bette, chou, ciboulette, cresson, épinard, laitue, mâche, oseille, persil,
- bases foliaires	pissenlit
- pétioles	Poireau
	Céleri, fenouil, rhubarbe
Légumes tiges	Asperge, chou-rave
Légumes racines	Betterave, carotte, céleri-rave, manioc, navet, panais, patate douce, radis, raitfort, rutabaga, salsifis
Légumes bulbes	Ail, échalote, oignon
Légumes fruits	
- charnus	Aubergine, concombre, cornichon, courge, courgette, piment, plantain, poivron, potiron, tomate et melon
- secs immatures	Gombo, haricot vert
- secs mûrs	Châtaigne, noix, noisette
Plantules entières	Pousse de soja, de radis, de luzerne
Bourgeons	Choux de Bruxelles, endive, pousse de bambou
II Inflorescences	Artichaut, brocoli, chou-fleur
D Graines	Fève, haricot, lentille, pois
cl Tubercules	Pomme de terre, taro, topinambour, igname, crosne du Japon
Rhizomes	Gingembre, lotus
m Carpophores	Champignon

végétaux peuvent être classés en cinq gammes ou catégories :

1. première gamme = végétaux frais en l'état ;

2. deuxième gamme = végétaux appertisés ;
3. troisième gamme = végétaux surgelés ;
4. quatrième gamme = végétaux conditionnés crus, frais, prêt à l'emploi. C'est-à-dire ayant fait l'objet d'un épluchage, coupage ou toute autre préparation touchant à l'intégrité du produit ;
5. cinquième gamme = végétaux cuits sous vide, prêts à l'emploi : produits pasteurisés voire stérilisés sous atmosphère modifiée.
6. sixième gamme = végétaux lyophilisés.

II.2. Traitements des fruits et légumes avant conservation industrielle

Les matières premières destinées à l'appertisation, à la congélation ou à la déshydratation sont toujours soumises à une préparation en vue des traitements ultérieurs. Les opérations de préparation et l'ordre dans lequel elles interviennent varient selon la nature de la matière première et le produit que l'on veut obtenir. Nous ne décrivons ici que les principales d'entre elles.

II.2.1. Le nettoyage et le lavage

Ces opérations sont pratiquées sur la plupart des fruits et légumes ; elles sont d'autant plus importantes que les végétaux sont couverts de terre ou de sable et donc de charge microbienne élevée (*Clostridium botulinum* est une bactérie du sol). Le nettoyage permet d'éliminer les matières étrangères légères et les poussières. Celles-ci sont éliminées par une soufflerie. La puissance de la soufflerie doit être réglable pour obtenir une séparation efficace du légume et des débris végétaux pouvant avoir une densité voisine.

Le lavage consiste à éliminer les résidus de produits antiparasitaires éventuellement présents sur les denrées ; ces produits présentent une certaine toxicité pour le consommateur mais peuvent aussi altérer les qualités organoleptiques des aliments. La maîtrise des résidus de produits antiparasitaires dépend essentiellement du mode cultural : respect des doses, respects des délais réglementaires entre l'application des antiparasitaires et la récolte du végétal.

Il existe deux modes de lavage :

✓ *Le lavage par aspersion* soit :

- par des laveurs à jet : les fruits et légumes, déposés sur un tapis perforé ou grillagé, passent sous des jets d'eau sous pression ; ce système permet de nettoyer de grandes quantités de légumes (**Fig.35**).

- ou des laveurs à tambour rotatif : ce type de lavage correspond à la mise en rotation d'un cylindre dans lequel avance le produit, aspergé par un système de jets (**Fig.35**).

✓ *Le lavage par immersion :*

Les fruits et légumes de densité plus faible (épinards, champignons ...) ont tendance à flotter. Le produit est alors immergé dans l'eau par des pâles et des guides qui le forcent à entrer dans l'eau. L'agitation est améliorée dans certains laveurs par de l'air comprimé envoyé par des buses. Lorsque le lavage est difficile, l'eau peut être additionnée de chlore, ou encore d'agents mouillants (anti-mousse) pour améliorer l'efficacité de l'opération.



a

b

c

a- Lavage par aspersion b- lavage à jet, c- Lavage par immersion

Figure 35 : Exemples de lavage

II.2.2 Le triage

Il a pour but d'éliminer les produits défectueux (pourris, pas assez mûrs ou écrasés) et les matières étrangères au produit. Le triage selon la couleur est un important indice de maturité des fruits. Cependant certaines teintes sont des signes d'altération ou sont simplement rejetées par le consommateur : c'est pourquoi la décoloration artificielle, par l'acide sulfureux, de fruits et légumes est pratiquée. Le triage est généralement effectué à l'œil nu. L'emploi d'appareils automatiques munis de cellules photoélectriques est relativement rare ; en revanche le travail des ouvriers est souvent facilité par l'installation de transporteurs à rouleaux et un éclairage approprié ; les produits sont ainsi facilement visualisés de tous les côtés.

II.2.3 Le calibrage

Le calibrage consiste à trier les légumes selon leur taille pour les répartir en lots homogènes ; il est souvent nécessaire pour préparer le produit aux opérations ultérieures (pelage, découpage, tranchage, pressage des agrumes...). Mais l'opération de calibrage est souvent imposée par des normes réglementaires : c'est le cas des petits pois et des haricots verts. Bien souvent, la grosseur des fruits et légumes n'est pas liée à la qualité gustative mais joue surtout du point de vue de la présentation. Il existe différents types de calibreuses adaptés aux différents produits : calibreuses à vibration, pour les produits les plus fragiles ou calibreuses à tambour rotatif, pour les plus résistants. Les appareils de calibrage fonctionnent selon le

même principe : les fruits ou légumes passent au travers des trous ou fentes de calibre déterminé, afin de constituer des lots homogènes (Fig.36).



Figure 36 : Exemples de calibrage des fruits et légumes

II.2.4 Le pelage

Il est rare qu'un végétal soit utilisé tel qu'il est récolté ; le plus souvent on n'en retient que certaines parties : on enlève les éléments non comestibles ou indésirables. C'est l'exemple de l'écosage des petits pois, de l'éboutage des haricots verts, de l'enlèvement des pédoncules de cerises, des noyaux de pêches, des calices de fraises ... Dans la majorité des cas, on emploie des appareils automatiques, conçus pour une opération déterminée, des variétés appropriées et des éléments de taille uniforme. Les méthodes employées pour le pelage des fruits et légumes sont diverses :

- ❖ le pelage mécanique : par couteaux mobiles (asperge) ou par abrasifs dont la plus connue est «la parmentière » : bol dont les parois sont recouvertes de Carborandum (châtaigne, pomme de terre).
- ❖ le pelage à la vapeur : le produit est mis en contact avec la vapeur sous pression. Le produit est ramolli en périphérie par effet de cuisson. La remise brusque à pression atmosphérique fait éclater la peau. Les peaux sont ensuite éliminées par des jets d'eau ou par brossage.
- ❖ Le pelage chimique : immersion dans une solution alcaline chauffée à 80°C (salsifis, pêche, poire, pomme). Le produit est ensuite rincé à l'eau courante dans de l'eau légèrement acidifiée par de l'acide citrique.
- ❖ L'éboutage : opération spécifique au haricot vert. Elle consiste à enlever les deux extrémités du haricot (Fig.37).



Figure 37 : Ebutage des haricots verts

II.2.5. La découpe

Pour certaines présentations des fruits et légumes, ceux-ci doivent être découpés en moitié, en quartiers, en tranches, en lamelles, en cubes. Chaque type de découpe possède son propre appareil (**Fig.38**). Il a pour but de réduire la taille des fruits et légumes de façon à réduire la durée des traitements de conservation : il facilite la migration de l'eau au cours du séchage, le transfert de chaleur à l'appertisation et ainsi assure une meilleure conservation des qualités organoleptiques et nutritionnelles des fruits et légumes.



Figure 38 : Découpage des fruits et légumes

II.2.6 Le blanchiment

Le blanchiment consiste à porter rapidement les légumes à haute température ($\approx 100^{\circ}\text{C}$) puis à les refroidir rapidement pour éviter une surcuisson des produits, souvent associée à une perte importante de vitamines.

❖ Les objectifs du blanchiment sont principalement la destruction des enzymes, la désaération du produit, et la modification de la structure ou de la couleur :

- la destruction des enzymes est la fonction essentielle du blanchiment. Elle permet de bloquer l'activité enzymatique des légumes pour éviter leur dégradation lors des étapes de fabrication ultérieures (bruissement, détérioration des qualités organoleptiques).

- la désaération du légume permet d'éliminer l'air et les autres gaz occlus dans les tissus. La libération de ces gaz peut entraîner le bombage ou le flochage des emballages par pression, ou encore accélérer de la corrosion ultérieure des aciers des boîtes métalliques dans le cas de la stérilisation. Ces gaz peuvent aussi entraîner une oxydation des produits en donnant des colorations anormales lors de la surgélation ou de l'appertisation.

- la modification de la structure : le blanchiment permet d'assouplir le tissu végétal de façon à lui permettre de supporter sans dommage les manipulations ultérieures et à réduire son volume apparent afin de faciliter ou rendre possible le conditionnement dans des emballages.

- la correction de la teneur en eau : la majorité des légumes subissent des pertes en eau plus ou moins importantes au cours de la cuisson (épinards, petits pois, champignons). Les légumineuses au contraire reprennent une certaine quantité d'eau à la cuisson (flageolets, lentilles). Le blanchiment assure une meilleure régularité de ces pertes ou gains de poids et permet un meilleur pilotage des fabrications.

Le blanchiment permet encore d'accroître la perméabilité des parois cellulaires, ce qui augmente la vitesse de déshydratation et facilite la réhydratation ultérieure, de compléter le lavage du produit, en réduisant aussi bien les contaminations d'origine chimique que la charge microbienne et possède également l'avantage de réduire le temps de cuisson lors de la préparation culinaire.

- Les techniques du blanchiment :

On distingue le blanchiment à l'eau bouillante et le blanchiment à la vapeur ; leur utilisation dépend du fluide caloporteur et du légume à transformer.

Dans le cas du blanchiment à l'eau : on immerge les légumes dans de l'eau bouillante de façon à ce qu'il soit totalement recouvert. Cependant il entraîne des pertes nutritionnelles par dissolution et apporte au produit une quantité non négligeable d'eau libre (**Fig.39**).

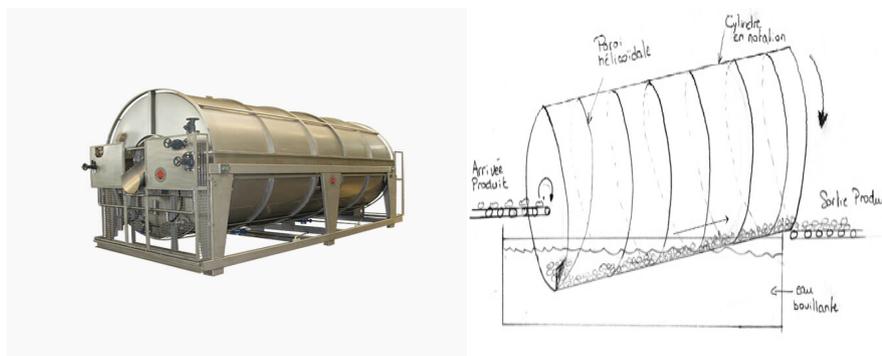


Figure 39 : Machine de blanchiment à l'eau bouillante

▪ Pour le blanchiment à la vapeur : les légumes sont plongés dans une atmosphère de vapeur créée par l'ébullition d'un certain volume d'eau au fond du récipient. Ils sont disposés dans un treillis métallique en couches de faible épaisseur et non tassées de façon à être soumis uniformément à l'action de la vapeur. Le blanchiment à la vapeur permet une meilleure rétention des nutriments et procure une meilleure qualité hygiénique du produit par un apport plus faible d'eau libre au produit. Néanmoins, pour les denrées de fort diamètre comportant des feuilles (choux de Bruxelles ou cœur de céleri, par exemple), le blanchiment à la vapeur est moins efficace en raison de la pénétration de chaleur plus difficile (Fig.40).

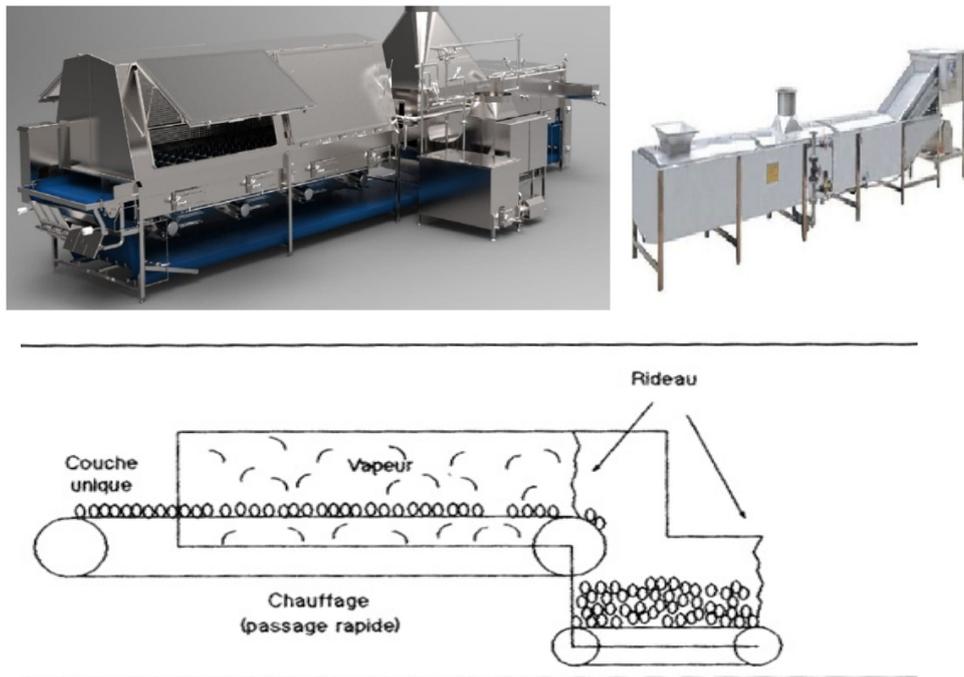


Figure 40 : Machine de blanchiment à la vapeur

- Les fruits ne sont généralement pas blanchis, hormis ceux qui seront transformés après décongélation (pêches, abricots, pommes) : fruits au sirop, confiture ... en raison de leur aspect peu appétissant.

II.3. Les technologies de conservation industrielle

Les traitements de conservation appliqués aux aliments visent à préserver leur comestibilité et leurs propriétés gustatives et nutritives en empêchant le développement des bactéries, champignons et microorganismes qu'ils contiennent et qui peuvent dans certains cas entraîner une intoxication alimentaire. Les trois méthodes utilisées pour la conservation des aliments reposent sur :

- **La chaleur** : pasteurisation, stérilisation, appertisation, semi-conserves ;
- **Le froid** : surgélation, congélation, réfrigération ;
- **Autres techniques** : conditionnement sous vide ou sous atmosphère modifiée, lyophilisation, déshydratation et séchage, fermentation, salage, confisage, saumurage, fumage ou fumaison, ionisation, etc.

II.3.1 Par la chaleur

II.3.1.1 La conserve appertisée

Inventé vers 1800 par Nicolas APPERT (**Fig.41**), l'appertisation est l'un des procédés de conservation les plus employés. Cette technique consiste à enfermer les aliments dans des récipients hermétiquement clos et à les soumettre à un chauffage assurant la destruction ou l'inactivation des microorganismes et des enzymes susceptibles de les altérer.



Figure 41: Apparition des boîtes de conserves

La technologie de l'appertisation des fruits et légumes permet une conservation longue des denrées à température ambiante. Elle permet parallèlement d'offrir au consommateur une présentation du produit qui allie praticité et qualités organoleptiques et nutritionnelles.

► Les semi-conserves :

Les semi-conserves sont des denrées alimentaires périssables, conditionnées en récipients étanches aux liquides, et ayant subi un traitement de conservation (pasteurisation, salage, séchage, etc.) en vue d'en assurer une conservation plus limitée que les conserves. Elles doivent être stockées au froid. Elles comportent le plus souvent une date limite de consommation, mais peuvent comporter, compte tenu de leur durée de conservation (le plus souvent de quelques mois), une date de durabilité minimale.

► L'appertisation (conserves) :

Ce procédé associe deux techniques :

- Un conditionnement dans un récipient étanche.
- Un traitement thermique (en général la stérilisation). Les produits obtenus peuvent se conserver plusieurs années à température ambiante (5 ans maximum). Elles comportent une date de durabilité minimale, la date passée, la denrée perd de ses qualités gustatives ou nutritives sans pour autant constituer un danger pour celui qui la consommerait. Les principales étapes de l'élaboration des fruits et légumes appertisés sont les suivantes :

- *La préparation*
- *Le blanchiment*
- *L'emboîtage*
- *Le traitement thermique*

Le schéma général et le diagramme des fruits et légumes appertisés sont présentés dans la figure 42.

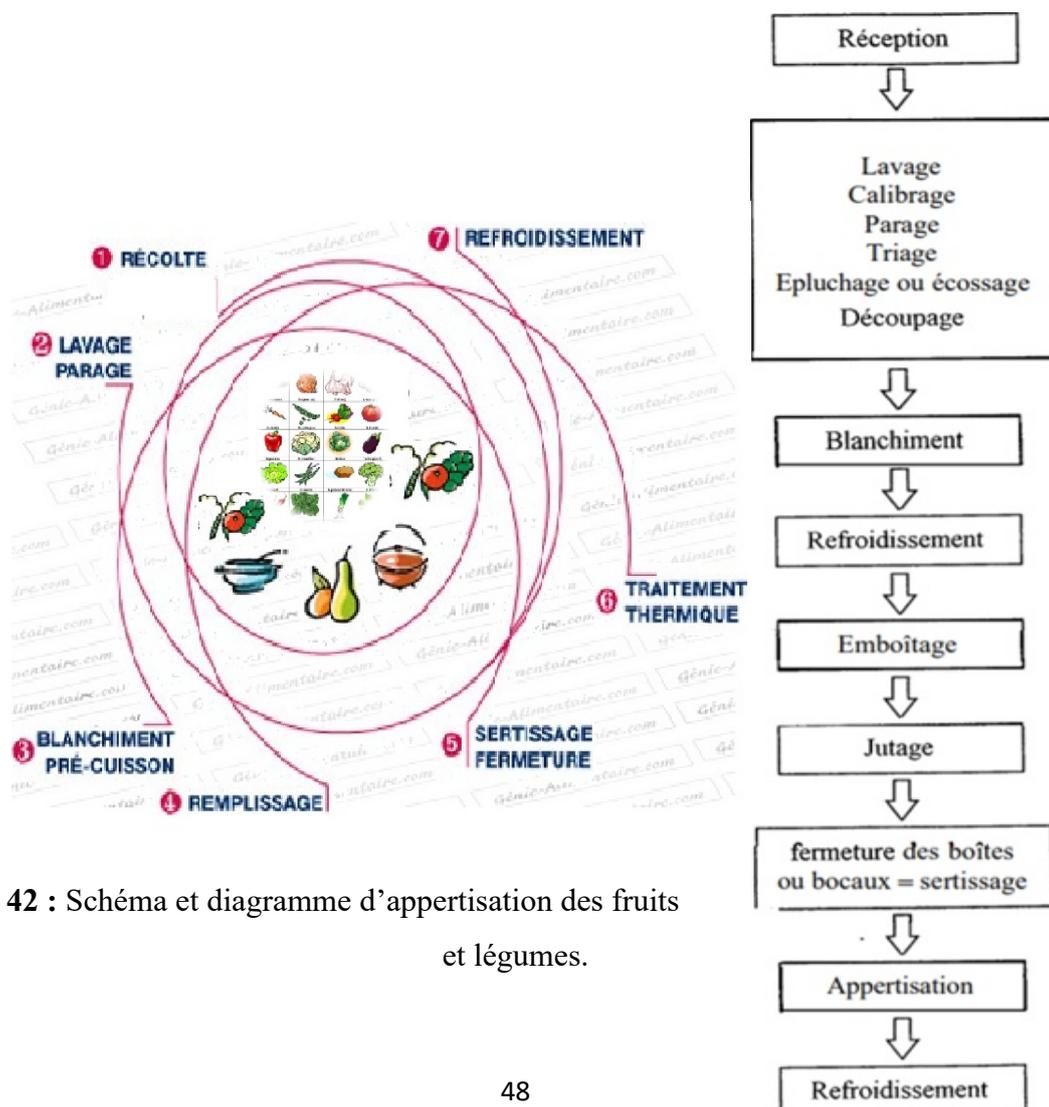


Figure 42 : Schéma et diagramme d'appertisation des fruits et légumes.

- Chaque étape entraîne des choix technologiques différents en fonction du produit traité. Les deux premières étapes (préparation et blanchiment) ont été citées précédemment. Ci-après une liste de produits très couramment disponibles dans les marchés d'alimentation (**Fig.43**).



Figure 43: Exemples de produits appertisés : fruits et légumes, soupes et sauces

II.3.1.1.1. L'emboîtement

L'opération d'emboîtement (**Fig.44**) ou de remplissage des récipients consiste à distribuer dans chaque récipient une masse constante de légumes.



Figure 44 : Quelques exemples d'emballage destinés à l'appertisation

- Trois types d'emboîtement sont utilisés selon le produit traité :

a) **L'emboîtement volumétrique** : pour les produits dont la densité peut être considérée comme uniforme. Le système le plus utilisé est le remplissage ou l'emboîtement à poche. A partir d'un tamis, le produit est distribué dans des poches de volume connu entraînées par un

barillet. Un système de cames libère le fond de la poche au-dessus du récipient (**Fig.45**). Le volume de la poche est ajustable grâce à l'utilisation de deux plateaux coulissants. Ce système est utilisé pour les petits pois, les haricots en grains et les légumineuses.



Figure 45 : L'emboîtement volumétrique

b) **L'emboîtement par les machines Sobern ou Nico :** Ces machines ont été conçues pour emboîter des produits difficiles à distribuer dans des emboîteuses volumétriques. Le produit est distribué en nappe au-dessus des boîtes à l'aide d'un cylindre équipé de barrettes. Le produit retombe dans les boîtes qui sont agitées en permanence pendant leur trajet dans le tambour. Le produit qui n'est pas entré dans le récipient est repris en bas du cylindre et effectue un nouveau cycle. Le réglage de la quantité distribuée se fait par ajustage de la vitesse de rotation du tambour et de la vitesse d'avancement des récipients. La machine Nico utilise un tapis vibrant pour répartir le produit au-dessus des boîtes à la place du cylindre de la Sobern. Ce type d'emboîteuse est utilisé pour des produits comme les haricots verts.

c) **L'emboîtement par pesée :** Pour certains légumes qui n'adhèrent pas trop aux parois des trémies, l'utilisation des peseuses associatives est possible (**Fig.46**). Le développement de leur utilisation dans les conserveries est limité par leur faible vitesse d'emboîtement et par leur coût.



Figure 46 : Techniques d'emboîtement par pesée et automatique

II.3.1.1.2. Le jutage

La plupart des conserves appertisées reçoivent un liquide de couverture. Ce liquide a pour fonction :

- De faciliter les échanges thermiques pendant la stérilisation
- D'amortir les chocs mécaniques au cours du transport
- D'incorporer de façon homogène les ingrédients (arômes, épices) et additifs (acidifiants).

L'opération de jutage peut s'effectuer à reflux, mécaniquement ou sous vide. La température du liquide doit être la plus près possible de la température d'ébullition. Pour les légumes, le liquide de couverture est distribué par des rampes jusqu'à un débordement des récipients : on parle de jutage à reflux.

En ce qui concerne les conserves de fruits, le jutage est très souvent réalisé sous vide. En effet, les produits de faible densité ou contenant beaucoup d'air occlus ont tendance à flotter. Le jutage est plus délicat pour obtenir une bonne désaération du contenu de l'emballage. Des juteuses sous vide sont alors utilisées, dont le fonctionnement est le suivant :

- Mise sous vide à l'intérieur de la boîte
- Introduction du liquide de couverture par la dépression.

Le jutage possède toutefois l'inconvénient de dissoudre certains éléments nutritifs qui sont perdus lorsque l'on jette le liquide (**Fig.47**).

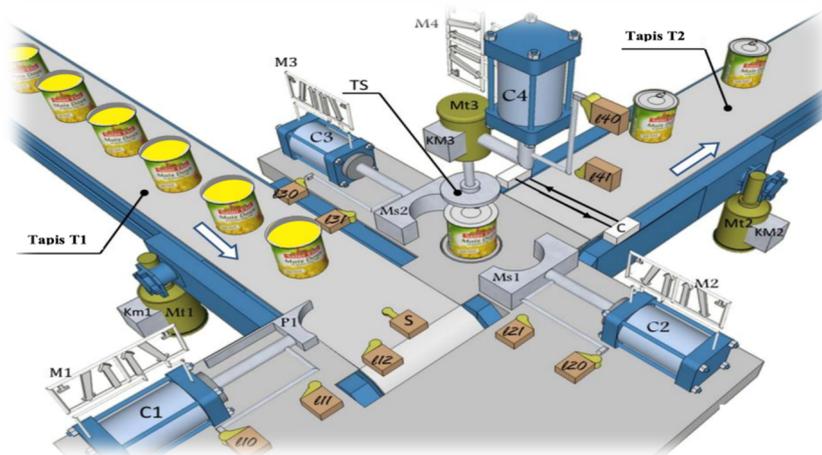


Figure 47 : Juteuse automatique

II.3.1.1.3. Le sertissage

Très rapidement après le jutage, on doit fermer les boîtes en enlevant le maximum d'air : c'est le sertissage pour les boîtes métalliques ou le capsulage pour les bocaux en verre (**Fig.48**). En

enlevant l'air des boîtes et en fermant le tout, on doit s'assurer de la résistance à la surpression ou à la dépression ainsi qu'à l'étanchéité permanente. Les bocaux de verre sont fermés par des capsules « twist-off » en fer-blanc. Pour les bocaux de verre, cette étape se fait sous vide. L'opération de **sertissage** permet donc la fermeture hermétique des boîtes métalliques. On pose sur la boîte un couvercle sur lequel se trouve un joint. Les deux bords du couvercle et de la boîte sont enroulés ensemble. Puis, par serrage, le tout est comprimé, ce qui permet de fermer la boîte d'une façon parfaitement étanche.



Opération de sertissage

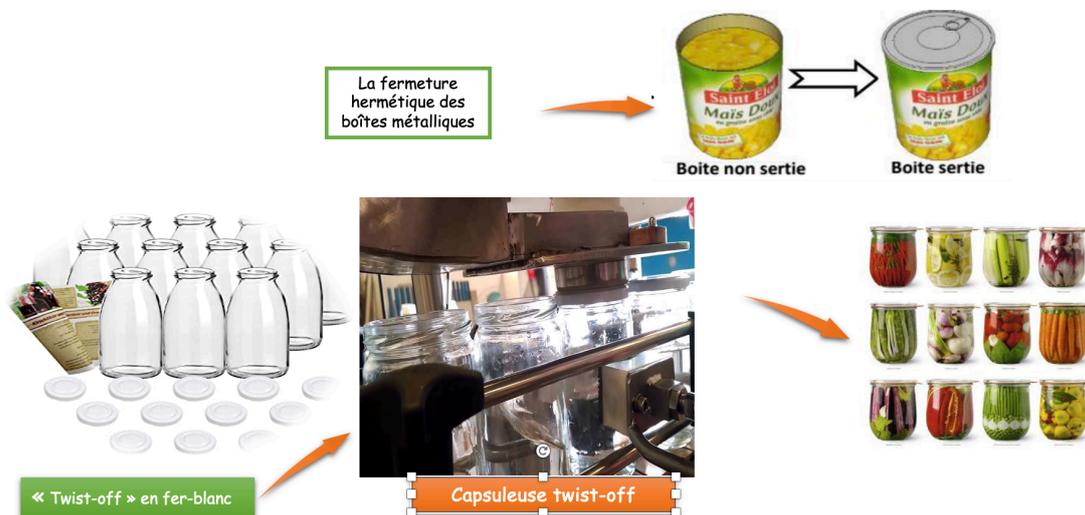


Figure 48 : L'opération de sertissage et technique de fermeture des boîtes

- La durée de conservation est liée à la qualité de fermeture des boîtes. Le sertissage a lieu juste avant le passage des boîtes à l'autoclave.

II.3.1.1.4. Le traitement thermique ou autoclavage :

C'est l'étape de la stérilisation (ou pasteurisation si le produit est acide ou si le produit est destiné à être conservé au frais comme les semi-conserves). Le chauffage sert à la fois à cuire les aliments appertisés et à détruire les microorganismes et les spores des bactéries. L'établissement des paramètres du traitement thermique (temps-température), dépend à la fois de la nature du légume (forme, structure), des caractéristiques du liquide de couverture et du type d'emballage.

- Dans le procédé d'appertisation, la chaleur du fluide chauffant, permettant la destruction des microorganismes, est transmise au contenu à travers la paroi du récipient et pénètre plus ou moins rapidement à l'intérieur du produit (**Fig.49**), en fonction de sa conductivité thermique. Les denrées appertisées, constituées de morceaux dans un liquide de couverture, s'échauffent par convection. C'est le cas des petits pois et des champignons par exemple. Pour ces produits s'échauffant rapidement, des barèmes de stérilisation à haute température temps courts appelés HTST (High Temperature Short Time) sont souvent utilisés ; ils évitent une surcuisson des fruits et légumes. Les denrées denses ou compactes, comme les purées de légumes (**Fig.50**), s'échauffent par conduction. La chaleur se propage de molécule en molécule. La pénétration de chaleur est plus lente. Les barèmes HTST ne peuvent pas s'appliquer.

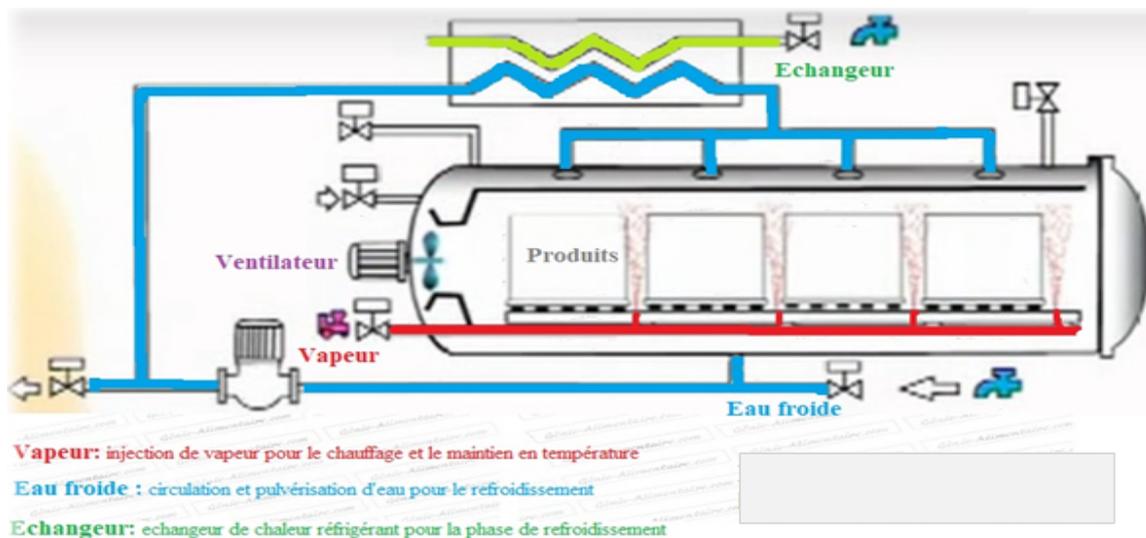


Figure 49 : Principe de fonctionnement de l'autoclave vapeur



Figure 50 : Autoclavage des soupes

- Voici quelques exemples de barème de stérilisation pour des produits conditionnés en boîtes métalliques de 850 ml stérilisées dans des autoclaves automatiques (température initiale 60°C)

Tableau 10 : Exemples de barème de stérilisation pour des produits conditionnés en boîtes métalliques.

Légumes	Barème de stérilisation	
	Durée en minutes	Température en °C
Champignons de couche	15	125
Endives	25	125
Epinards en branches	76	125
Haricots verts entiers ou coupés	13	125
Petits pois	12	125

Parmi la grande variété d'appareils qui existent actuellement sur le marché, les stérilisateur les plus couramment utilisés dans les conserveries de fruits et légumes sont les suivants :

- Autoclaves horizontaux et verticaux pour le type d'appareil discontinu,
- Les statiques et les rotatifs pour les appareils continus.

Les autoclaves verticaux sont utilisés pour des fabrications en petites séries. Les autoclaves horizontaux sont bien adaptés pour la stérilisation de produits en bocaux de verre. Les appareils continus sont très couramment utilisés dans les conserveries de légumes pour leur cadence élevée de production.

- Certains légumes sensibles à l'oxydation, comme le maïs doux, sont conditionnés sous- vide sans liquide de couverture. Ce vide est obtenu mécaniquement. Les boîtes remplies avec le produit sont fermées dans une enceinte sous-vide. Le système utilisant des sertisseuses sous-

vides est le plus courant mais il existe d'autres procédés permettant l'appertisation des denrées sans liquide de couverture :

- le conditionnement aseptique en emballage continu (selon le procédé Tétrapak ou Combi bloc) est utilisé pour certaines préparations, comme les purées de légumes.
- le conditionnement aseptique sous-vide (selon le procédé Vatech) qui permet d'obtenir les produits sous-vide (cuits à la vapeur).

✓ Le choix des emballages Le choix des emballages des produits stérilisés est de type métallique ou de verre. Les spécifications des emballages métalliques sont fonction de l'agressivité du produit (pH, teneur en nitrate) par rapport au métal (aluminium ou acier). Les pots industriels en verre sont généralement choisis avec une large ouverture de façon à faciliter le remplissage et permettre un dégazage plus aisé. Le choix des revêtements des capsules métalliques (vernis simple ou renforcé) est fonction de l'agressivité du produit.

- **La pasteurisation**

Cette technologie est appliquée lorsque les caractères physico-chimiques du produit permettent de se débarrasser facilement de nombreuses catégories de microorganismes et empêchent la prolifération des espèces les plus thermorésistantes. C'est souvent le cas pour les fruits et les jus de fruits. Elle est souvent associée à d'autres mesures telles que l'emploi d'emballages clos hermétiquement et parfois sous vide ; la réfrigération ; l'addition d'acides (légumes au vinaigre ou acidifiés par fermentation lactique), de sucres (confitures) etc ...

II.3.2. Les techniques de conservation par le froid

La conservation au froid, pratique très ancienne, s'est répandue au début du XX^{ème} siècle avec le développement des techniques de production du froid artificiel. Le froid arrête ou ralentit l'activité cellulaire, les réactions enzymatiques et le développement des microorganismes. 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.

II.3.2.1. La réfrigération

Cette technique consiste à abaisser la température pour prolonger la durée de conservation des aliments. 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 sont seulement ralentis. La température des aliments réfrigérés est comprise entre 0 et + 4° C pour les denrées périssables les plus sensibles. La réfrigération retarde de quelques jours l'évolution d'une denrée périssable et permet d'allonger la durée de distribution des produits frais notamment les fruits et légumes.

- La température optimale de réfrigération varie d'une matrice végétale à une autre : Pomme se conserve 2 fois plus à 4° qu'à 15° (**Tab.11**) :

Tableau 11 : Exemples de fruits et légumes réfrigérés avec leur durée de conservation

Produits	Températures d'entreposage (C°)	Durées de conservation
Carotte	-1 à 1	4 à 6 mois
Artichaut	0	1 mois
Epinard	0	2 à 6 semaines
Pomme de terre	5 à 10	4 à 8 mois
Tomate	0	1 à 3 semaines
Banane	11 à 15	1,5 à 3 semaines
Pomme	-1 à 4	1 à 8 mois
Orange	4 à 6	Jusqu'à 6 mois
Fraise	0	5 jours

II.3.2.2. La congélation

La congélation est un procédé de préservation d'une denrée par refroidissement au-dessous de son point de congélation et par maintien ensuite à la température de -18°C à cœur du produit. Elle permet de cette façon à faire passer à l'état solide l'eau qu'elle contient. Cette cristallisation d'eau contenue dans la denrée permet de réduire l'eau disponible pour des réactions biologiques et donc de ralentir ou d'arrêter l'activité microbienne et enzymatique. Une technique qui est aussi utilisée à grande échelle pour conserver des fruits (pommes, poires) plusieurs mois dans les stations fruitières. Une bonne conservation implique que la charge microbienne soit la plus faible possible. Elle nécessite donc des conditions de fabrication, de préparation et de stockage hautement hygiéniques afin d'éviter les contaminations (*listeria*, salmonelles).

II.3.2.3. La surgélation

La surgélation consiste à congeler rapidement une denrée saine et en parfait état de fraîcheur, en abaissant sa température très rapidement inférieure à -18°C en tous points. Grâce à ce procédé, l'eau contenue dans les cellules se cristallise finement limitant ainsi la destruction cellulaire. Les produits ainsi traités conservent leur texture, leur saveur et peuvent être conservés plus longtemps (plusieurs mois, voire une année) sans modification notable des nutriments.

Ce mode de conservation est aujourd'hui très répandu, pour sa praticité et la grande variété de produits disponibles (fruits, légumes, viandes, poissons, plats cuisinés, boulangerie-pâtisserie...). Il implique un strict respect de la chaîne du froid (-18°C de la fabrication à la consommation). Les principales étapes de l'élaboration des produits surgelés sont les suivantes :

- **La préparation** : elle regroupe les opérations de nettoyage-lavage, calibrage, pelage et découpe. La charge bactérienne devant être la plus faible possible pour obtenir une bonne qualité microbiologique des produits
- **Le blanchiment** : Le blanchiment à la vapeur permet une meilleure rétention des nutriments, limite le phénomène de cristallisation et procure une meilleure qualité hygiénique du produit.
- **La surgélation** : elle survient quelques heures après la récolte, les opérations de surgélation traitent au mieux les valeurs nutritives des fruits et légumes : protides, lipides, glucides et minéraux demeurent intacts. Les déperditions en matière de vitamines sont égales et même souvent inférieures à celles subies par les produits frais après cuisson. **Exemple** : 90 % de la vitamine C des haricots verts étaient préservés après 300 jours de conservation à -18°C . Ainsi elle stabilise l'aliment dans un état donné, seule de tous les procédés de conservation, elle permet de restituer toutes les qualités organoleptiques des produits saisis dans leur fraîcheur initiale.
- **Les limites de la surgélation** Tous les fruits et légumes ne supportent pas la surgélation : ceux qui resteraient consommables ne seraient plus appétissants lors de la décongélation ; cela (légumes gorgés d'eau) outre le triage préalable et la sélection des produits, les denrées à surgeler doivent être particulièrement très fraîches et saines à l'origine. La plupart des microorganismes ne sont pas détruits par le froid, seule leur multiplication s'arrête et reprend dès la décongélation du produit. [15]

- **Le choix des emballages**, pour optimiser l'entreposage des produits surgelés Le conditionnement doit non seulement protéger son contenu des agressions extérieures : il doit être étanche à la vapeur d'eau afin de limiter la formation d'une couche de matières lyophilisées dues à la perte d'eau du produit lors de l'entreposage ; il doit limiter le phénomène de givrage dû aux variations de température lors de l'entreposage. Les films mis sous-vide ou certains films rétractables sont utilisés. [2]

II.3.2.4. Les techniques de congélation

a- Soufflage d'air froid : Cette technique est la plus couramment utilisée et la plus performante pour les légumes car elle permet la congélation de produits de formes très diverses. Le fluide frigorigène est de l'air pulsé sur des batteries d'évaporateurs. Les surgélateurs à air sont de deux types : discontinus (chambres froides où les produits sont introduits sur des chariots) ou continus (tunnels à bandes transporteuses, tunnels à lit fluidisé). Le procédé par « lit fluidisé », dans lequel le produit en vrac est congelé en même temps qu'agité et véhiculé dans un courant d'air froid, permet une congélation plus rapide mais ne s'applique qu'aux petits fruits et fragments de légumes.

b- Contact avec des surfaces métalliques refroidies

Les congélateurs par contact sont constitués d'une série de plaques horizontales ou verticales. Ces plaques, refroidies à -30°C ou -40°C sont pressées par des vérins lorsque l'appareil est chargé. Cette méthode convient particulièrement bien à des paquets rectangulaires ou à des produits malléables (purée de légumes).

c- Aspersions Ce procédé ne fait appel à aucune installation frigorifique. Il met en jeu un contact direct entre un gaz liquide (azote ou gaz carbonique) et le produit. Les surgélateurs sont constitués d'un tunnel où le gaz est vaporisé par des buses d'aspersion munies d'électrovannes, commandées par thermostat. Un ventilateur permet d'homogénéiser la distribution du fluide. En raison de son coût élevé, ce procédé est surtout utilisé pour des produits fragiles et à forte valeur ajoutée.

- Les différents équipements de conservation des fruits et légumes par le froid sont représentés dans la figure 51.



Chambres froides (1) Surgélateurs à lit fluidisé (2) Surgélateurs à plaques (3) Tunnel de surgélation (4)

Figure 51 : Équipements de conservation des fruits et légumes par le froid

II.3.3. La déshydratation :

Le séchage ou dessiccation est l'un des plus anciens procédés de conservation des aliments. Ce procédé permet d'éliminer par vaporisation, la majeure partie de l'eau libre des aliments. Du fait d'une faible activité de l'eau, les microorganismes ne peuvent pas proliférer et la plupart des réactions chimiques et enzymatiques sont ralenties. L'élimination d'eau permet également de réduire considérablement la masse et le volume des aliments (économies d'encombrement et de transport). Le schéma général des fruits et légumes déshydratés est présenté dans la figure 52 :

II.3.3.1. Mécanisme de l'élimination de l'eau

L'élimination d'eau d'un produit peut être obtenue soit par voie mécanique soit par voie thermique.

- L'élimination d'eau par voie mécanique :

Elle se caractérise essentiellement par trois points l'opposant nettement aux techniques faisant appel aux transferts de chaleur (**Tab.12**) :

- *Caractère limité* : les techniques citées ci-dessous ne permettent d'éliminer qu'une partie de l'eau libre des produits traités

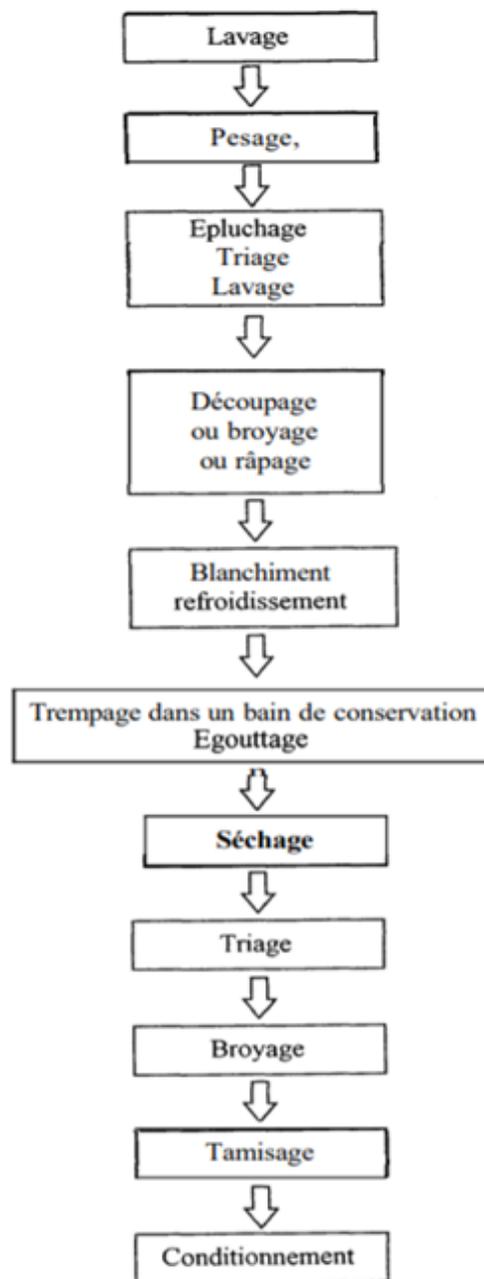


Figure 52 : Diagramme général de conservation par séchage.

- *Faible sélectivité* : la phase éliminée n'est pas de l'eau pure mais est constituée par une dispersion ou une solution plus ou moins riche en extrait sec. Seule, l'osmose inverse peut être considérée comme pratiquement sélective.
- *Faible consommation d'énergie* : le fait que seule la fraction aqueuse non liée soit éliminée implique une consommation moindre d'énergie.

Tableau 12: Les techniques d'élimination de l'eau par voie mécanique

Opération	Technique	Mécanisme
<u>Concentration</u>	centrifugation Filtration Ultrafiltration	Sédimentation forcée : Jus de tomate Tamisage Tamisage moléculaire
<u>Séchage</u>	Egouttage Essorage centrifuge Pressage	Gravité Tamisage Expression

- L'élimination d'eau par voie thermique :

L'une des façons de procéder à l'élimination de l'eau du produit consiste à provoquer son évaporation grâce à un apport de chaleur qui peut être réalisé :

+ **par rayonnement** : Les rayons solaires, dans ce cas-ci, provoquent un réchauffement direct du produit ;

- **InfraRouge ou MicroOndes** : un rayonnement électromagnétique est appliqué sur le produit. Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Le chauffage en infrarouge se manifeste sur des épaisseurs très faibles. Avec des micro-ondes on peut sécher à des épaisseurs plus importantes. Le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences excite les molécules d'eau : l'agitation moléculaire qui en résulte provoque des chocs intermoléculaires. Cela entraîne un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau.

+ **par convection** : l'air entourant le produit se trouve à une température plus élevée que le produit ;

+ **par conduction** : le produit est réchauffé par un contact direct avec une surface chaude. Il existe une grande diversité d'évaporateurs, adaptés à chaque type de produit traité.

- Les procédés de séchage thermique : soleil, séchoirs et tambour rotatif, sont illustrés dans la figure 53.

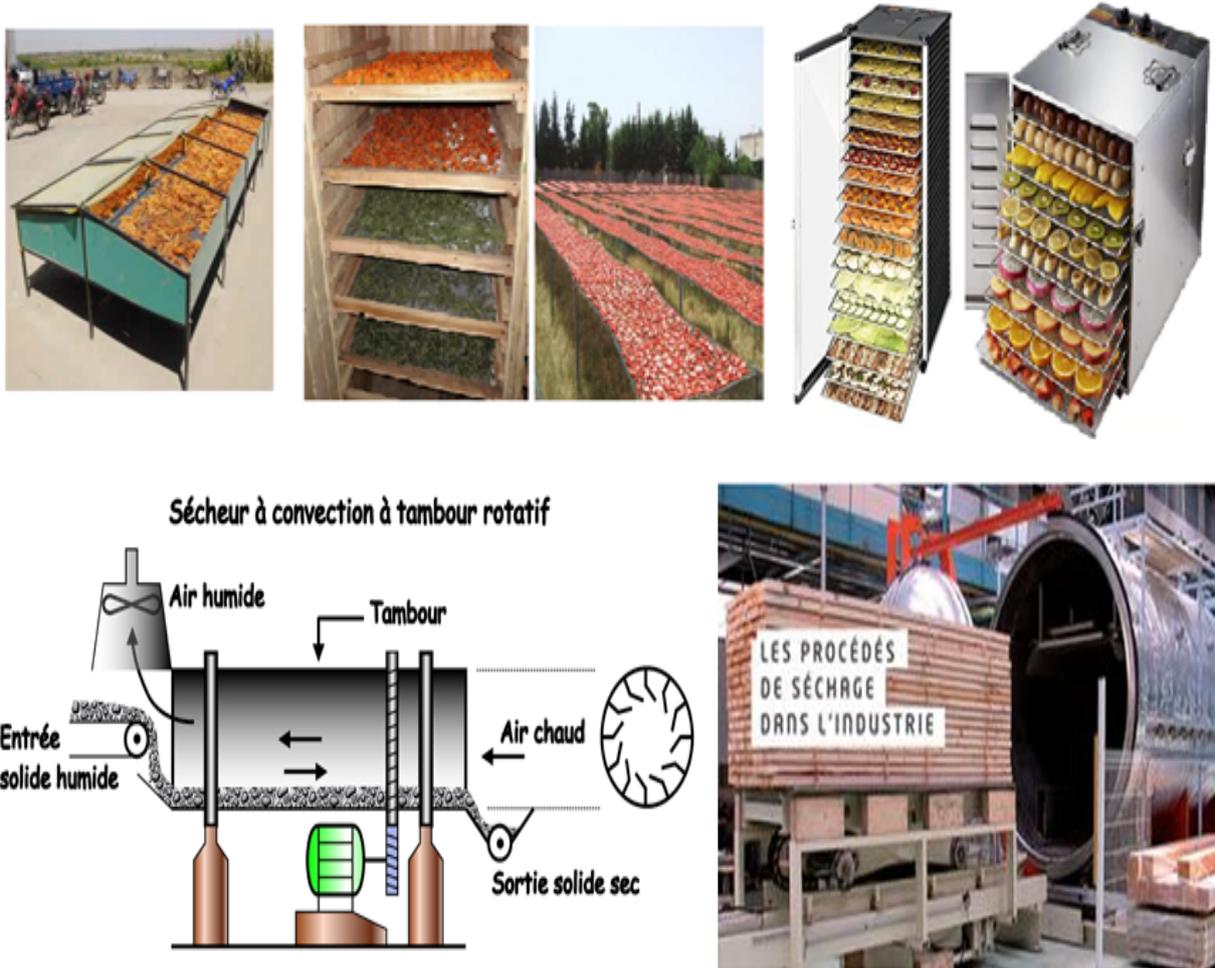


Figure 53 : Procédés de séchage thermique : soleil, séchoirs et tambour rotatif

II.3.4. La lyophilisation

Elle consiste à congeler un aliment puis à le placer sous vide: l'eau passe ainsi directement de l'état solide à celui de vapeur (sublimation).

- On distingue trois étapes principales dans ce procédé de conservation : la congélation rapide du produit à -20°C qui doit être entièrement solide, associée à une mise sous vide et une atmosphère sèche

- Le séchage, réalisé en deux temps :

- **La dessiccation primaire** : Elle consiste à sublimer toute l'eau congelée ou glace « libre » de l'aliment qui s'évapore ; le produit reste congelé durant cette phase (température $< 0^{\circ}\text{C}$).

- **La dessiccation secondaire (ou désorption)** : Elle consiste à éliminer l'humidité résiduelle, correspondant à de l'eau fortement liée, incongelable, lorsque toute la glace s'est sublimée. En fin de lyophilisation, le vide est cassé par l'azote (pour récupérer un produit très friable), en

atmosphère très sèche, et on le conditionne immédiatement dans un emballage étanche à l'air et à la vapeur d'eau. [15]

La forme et l'aspect des produits sont bien conservés, leur qualité aromatique est bien supérieure à celle des produits séchés. Du fait de son coût, cette technique est réservée aux fruits et légumes de valeur ajoutée tels que les champignons et certains potages instantanés.

- Le lyophilisateur (**Fig.54**) est composé des éléments suivants :

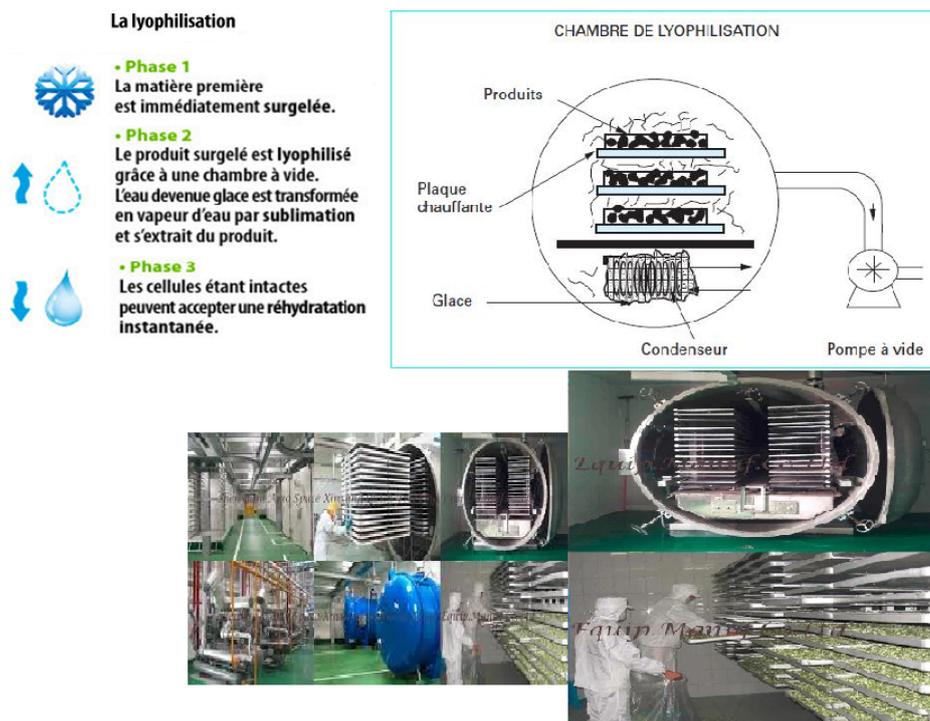


Figure 54 : Le lyophilisateur et la lyophilisation

- D'une chambre de séchage dans laquelle le produit est disposé sur une série de plateaux parallèles et horizontaux, d'une source de chaleur (plateaux à circulation de fluides, résistances électriques, rayonnements infrarouges ou micro-ondes) et d'un piège à glace et une pompe à vide.

II.3.5. Conservation par acidification

La fermentation est la transformation naturelle d'un ou plusieurs ingrédients alimentaires sous l'action de levures, ou de bactéries. Les plus importantes transformations de denrées alimentaires par la fermentation sont au nombre de trois :

- La fermentation alcoolique (vin) ;
- La fermentation lactique (cornichons) ;
- La fermentation acétique (vinaigre).

II.3.6. Autres techniques

II.3.6.1. Modification de l'atmosphère

- Le conditionnement sous vide

Il réduit la quantité d'air autour de la denrée alimentaire et donc l'action de l'oxygène sur celle-ci. Cela permet d'empêcher d'une part le développement des micro-organismes, dont la prolifération est une des causes de l'altération du produit, et d'autre part les réactions d'oxydation également à l'origine de dégradations du produit.

- Le conditionnement sous atmosphère modifiée (*emballage étanche*)

Il permet de remplacer l'air qui entoure la denrée alimentaire par un gaz ou un mélange gazeux (en fonction du type de produit), et de prolonger ainsi la durée de vie de celle-ci. Cette technique de conservation est associée à un stockage à basse température tout au long de vie du produit. Une mention inscrite sur l'étiquetage indique « conditionner sous atmosphère protectrice ».

II.3.6.2. L'ionisation

Elle repose sur l'exposition des denrées alimentaires à l'action de rayonnements ionisants électromagnétiques, qui a pour but d'augmenter la durée de conservation des aliments en éliminant les micro-organismes. Les sources de rayonnements ionisants font l'objet d'une liste exhaustive fixée par la réglementation. La liste des denrées alimentaires pouvant être traitées est limitée et concerne celles qui sont fréquemment contaminées et/ou infestées par des organismes et leurs métabolites, qui sont de nature à nuire à la santé publique (insectes, micro-organismes pathogènes, etc.). Ce traitement de conservation correspond à une technique maîtrisée et encadrée par la réglementation, et n'a aucun rapport avec les contaminations accidentelles pouvant résulter du contact des denrées alimentaires avec des sources radioactives.

D'autres technologies de conservation telles que la microfiltration, le chauffage ohmique, procédé au cours duquel le produit est chauffé directement par un courant alternatif basse tension, les ultrasons, les hautes pressions, les champs magnétiques pulsés ou la lumière pulsée se développent

II.4. Transformation industrielle :

La plupart des transformations réalisées aujourd'hui par l'industrie (**Fig.55**) étaient autrefois pratiquées artisanalement dans les fermes. Certains fruits et légumes sont traités en usine sans subir de véritables transformations, mais simplement pour être soumis à des conditionnements qui facilitent leur commercialisation. En revanche, de nombreux produits sont profondément transformés par des traitements physiques, chimiques ou encore biologiques dont le plus élaboré est la fermentation.



Figure 55 : Transformation industrielle des fruits

II.4.1. Définitions :

a- Jus de fruit

Selon le Codex Alimentarius (2005), le jus de fruits est le liquide non fermenté, mais fermentescible, tiré de la partie comestible de fruits sains, parvenus au degré de maturation, appropriés et frais ou de fruits conservés dans de saines conditions par des moyens adaptés et/ou par des traitements de surface post- récolte appliqués conformément.

b- Jus de fruits concentré

Produit non fermenté mais fermentescible après reconstitution, tiré du jus de fruits sains et mûrs déshydraté de façon que la teneur en matière sèche soluble, soit au moins double de celle du jus initial destiné à la consommation directe ; doit être conservé exclusivement par des procédés physiques.

c- Nectar de fruits

Produit non pulpeux non fermenté mais fermentescible, destiné à la consommation directe, obtenu par mélange de jus de fruit et de la totalité de la partie comestible de fruit sain et mûr. Il est concentré ou non additionné d'eau et de sucre. La teneur en jus de fruit ne doit pas être inférieure à 30%.

II.4.2. Prétraitements :

- **La récolte** : les fruits doivent être cueillis soigneusement ; toute manipulation future doit être effectuée avec soin afin d'éviter tout dommage mécanique.

- **La réception** : est effectuée principalement pour la vérification des mesures sanitaires et l'état de maturité et de fraîcheur du fruit. Une énorme attention doit être accordée à la propriété des fruits. La conformité de chaque lot doit être vérifiée.

- **Le stockage temporaire avant traitement** : cette étape doit être aussi courte que possible afin d'éviter les pertes de saveur, les modifications de texture, les pertes de poids et d'autres détériorations qui peuvent avoir lieu au cours de cette période.

- **Le lavage** : est obligatoire qui vise à éliminer toute contamination de la surface du fruit, la poussière, les insectes, les spores de moisissures et les saletés qui pourraient contaminer ou influencer la couleur, l'arôme ou la saveur du fruit.

- **Le triage** : pour la production des jus de fruits de qualité, cette opération consiste en l'enlèvement des fruits partiellement ou complètement cariés, les fruits endommagés et d'éventuels corps étrangers (ce qui pourraient avoir été laissés après le lavage), et un triage qualitatif basé sur les critères organoleptiques et le niveau de maturité.

- **Parage** : consiste à éliminer les parties des fruits jugés « non consommables », qui ne se conservent pas, et/ou qui ne correspondent pas aux caractéristiques du produit fini.

- **Dénoyautage** : Les technologies mises en œuvre pour l'élimination des noyaux ou des pépins sont très spécifiques aux caractéristiques initiales des fruits à traiter. Les opérations sont manuelles ou réalisées à l'aide de machines appropriées comme des tapis comportant des rangées d'alvéoles dans lesquelles les fruits s'encastrent.

II.4.3. Broyage :

Il consiste à préparer la pulpe avant le pressurage ou extraction, par un certain nombre d'opérations : Opération de découpage pour la tomate ; Opération de foulage pour le raisin ; Opération de râpage pour les pommes ; Il a lieu des broyeurs à couteaux, à marteaux ou autres.

II.4.4. Extraction ou pressage :

Consiste à séparer le produit en deux phases solide et liquide. Cette dernière étant presque toujours recherchée la plus claire possible, elle est caractérisée par les critères suivants :

- Le rendement de jus par rapport au fruit ;

- Le temps d'extraction ;
- Le taux en insoluble de jus (pectines, protéines).

II.4.4.1. Pressage par piston

La pulpe broyée tombe dans un cylindre horizontal et sont pressées par le biais de piston. Le rendement est élevé, le jus est presque clair mais le temps est assez long (60-90 min). Dans ce cas le pressage n'est pas continu (**Fig.56**).

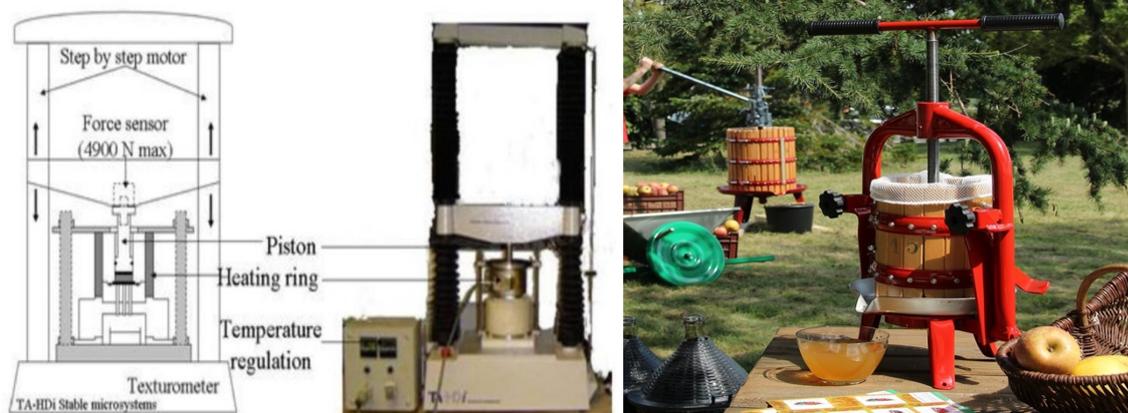
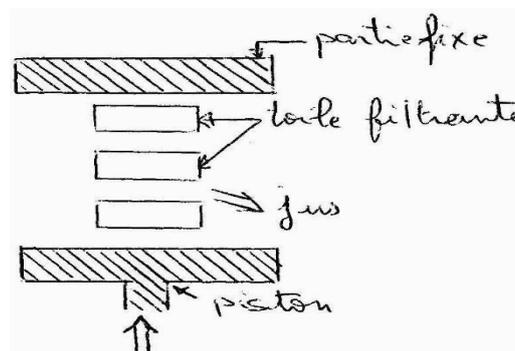


Figure 56 : Principe du pressage par piston

II.4.4.2. Presse à bandes

Les pulpes contenues dans une bande en toile de nylon ou en acier inox sont pressées mécaniquement entre les rouleaux de plus en plus rapprochés. La capacité peut avoisiner 3t/h pour les pommes et le taux d'extraction peut atteindre 70%. La durée de pressage est de quelques minutes. La presse travail en continu (**Fig.57**).

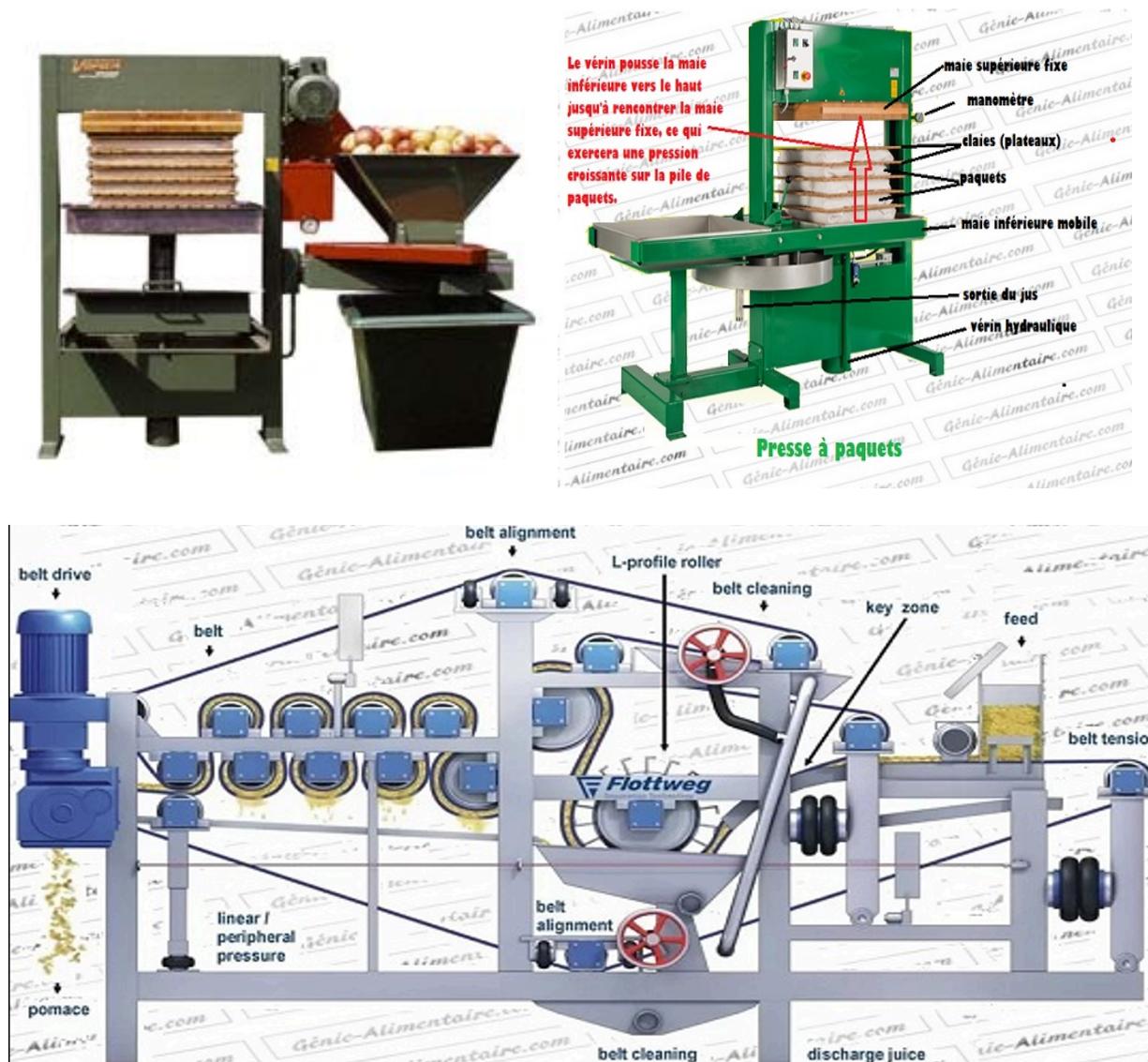


Figure 57 : Principe de fonctionnement du pressage à bande

II.4.4.3. Presse vis sans fin

Le procédé étant l'application de la pression mécanique d'une vis sans fin conique d'axe vertical à l'intérieur d'un tamis cylindrique. La profondeur des gorges de la vis sans fin diminue au fur et à mesure de sa progression le long de la vis, il en résulte une réduction de volume dans la zone de compression et donc une extraction régulière du jus. La perforation du tamis est différente dépendant essentiellement de la nature du produit. Le rendement théorique est de 80%. Les jus sont chargés en insolubles à cause de déchirement de la pulpe pendant l'avancée dans le cylindre ; il est surtout appliqué pour les olives, pommes, poires et raisins. (Fig.58).

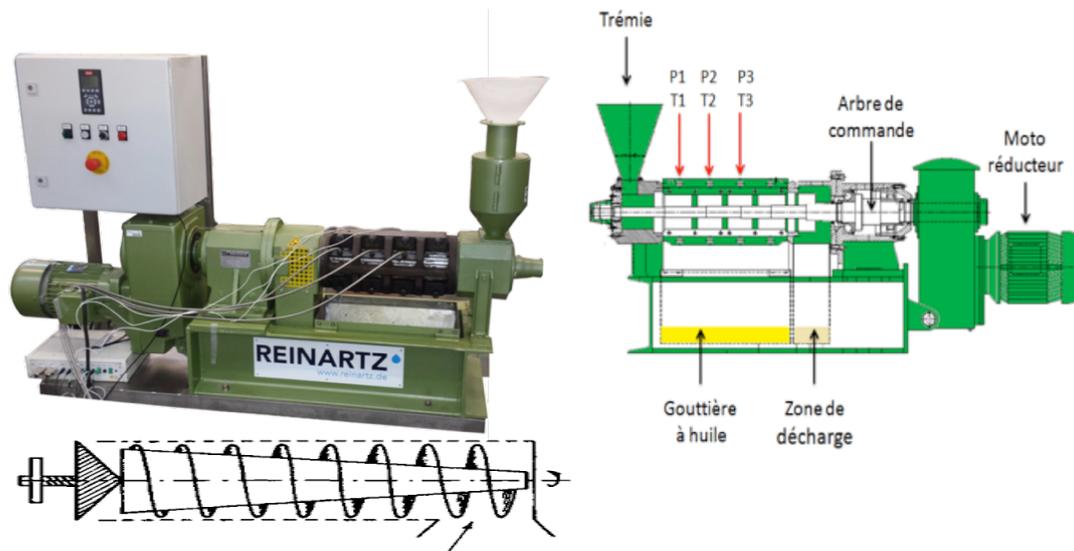


Figure 58 : Presse vis sans fin

II.4.4.4. Autres extracteurs

a- Extracteur pour agrumes

Le fonctionnement se fait selon des positions :

- **1ère** : le fruit est positionné dans un bol puis la partie haute de l'appareil descend, tandis que le bout dur du tube (2ème moitié de l'appareil) découpe un trou à la base du fruit.
- **2ème** : le fruit est comprimé entre les doigts métalliques le jus seul est extrait de la pulpe qui traverse un tube perforé.
- **3ème** : un tube central muni d'une butée monte et comprime le contenu du tube qui exprime le jus résidu.
- **4ème** : les essences des écorces sous l'effet de la compression s'écoulent vers l'extérieur du fruit et sont entraînés le long d'un convoyeur. Un espace annulaire a été prévu en haut des bols pour évacuer séparément l'écorce à la fin des cycles.

b- Extracteur centrifuge

Utilisé notamment pour les jus de pommes, c'est une extraction continue par essorage. Son principe est le suivant : La plaque de pomme est introduite au sommet du bol de l'essoreuse tournant à 3000 tr/min, puis elle est comprimée contre un tamis de la centrifugeuse. La durée est quelques secondes contre 60 min pour une presse hydraulique. Les risques d'oxydation sont presque nuls. Le fruit essoré a des compositions différentes car le parfum, la couleur et la saveur sont beaucoup plus voisines de ceux du produit frais. Cependant, il doit être traité

aussitôt (inactivation des enzymes notamment du brunissement) par désaération, pasteurisation puis éventuellement une centrifugation et le jus est alors limpide.

II.4.5. Clarification des jus

Elle a pour but de séparer par centrifugation le jus brut sortant des presses des particules grossières de la pulpe fibreuse riche en substances amères. Le liquide à traiter est introduit dans le centre du bol par le tube d'alimentation, il passe entre les assiettes où il est dérivé en couches minces sous l'effet de la force centrifuge. Les matières solides sont expulsées du flux et dirigées vers l'extérieur.

II.4.6. Stabilisation des jus

Les jus est une suspension de matière insoluble maintenue en solution par des colloïdes, cette suspension plus ou moins stable est commercialisable bien que trouble. Cependant, pour pouvoir obtenir des jus clairs donc moins fragiles, il est nécessaire d'enlever ces colloïdes (**Fig.59**). ; on a recours à différents moyens :

- **Précipitation** : elle se fait par le biais de tanins qui se combine aux ports. Cette opération est appelée collage. Cependant, on peut assister à un freinage au niveau de l'opération de la décantation.

- **Solubilisation** : elle se fait par le biais d'enzymes. Les matières insolubles responsables du troubles n'étant plus maintenues en solution, peuvent précipiter. L'opération peut être terminée par une désaération du jus qui passe en couches minces dans une enceinte sous vide pour une meilleure stabilisation du jus et pour mieux conserver la vitamine C.

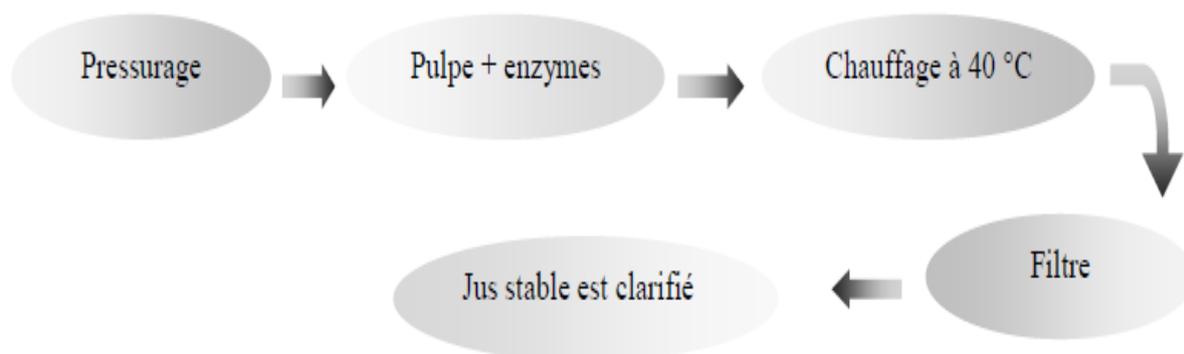


Figure 59 : Stabilisation des jus

II.4.7. Pasteurisation des jus :

a- Pasteurisation par la chaleur

Ce traitement thermique est la méthode la plus utilisée pour la conservation du jus de fruits. Il vise à tuer les micro-organismes et à inactiver les enzymes qui pourraient altérer le produit ou le rendre impropre à la consommation humaine.

- Pasteurisation après conditionnement
- Pasteurisation « éclair » suivie de remplissage aseptique
- Le remplissage à chaud et auto-pasteurisation

b- Par les rayonnements La pasteurisation est obtenue par le rayonnement d'une source UV ou IR qui traverse un tube en quartz fondu dans lequel circule et s'échauffe le jus

c- Filtration stérilisante On utilise des filtres dont le diamètre est inférieur à celui des μ -organismes.

II.4.8. Concentration des jus :

La concentration facilite le transport et l'entreposage des jus. La concentration des jus de fruits est la plus souvent réalisée par évaporation sous vide d'une partie de l'eau de jus. Les appareils permettent de travailler en continu et en couches minces.

II.4.9. Stockage des jus :

Le jus de fruits brut peut être stocké en cuves et les procédés permettant d'inhiber les enzymes et les micro-organismes sont :

- Le froid vers 0°C : à plus de 0°C les fermentations nous obligeraient à faire des pasteurisations successives.
- La conservation sous pression de CO₂ : le CO₂ utilisé avoisine 15 g/l, le jus n'est pas totalement à l'abri de la fermentation lactique. L'élimination compétitive du CO₂ est difficile de telle sorte que les jus conservés par ce procédé sont toujours légèrement pétillant.
- Pasteurisation « éclair » suivie de réfrigération jusqu'à 0-2°C et entreposage à cette température de préférence sous azote pour éviter le développement des moisissures à la surface.
- La conservation par sulfutage : le SO₂ protège à la fois, même à faible concentration, contre le brunissement enzymatique et autre oxydation.

Chapitre III : Technologie des céréales

Généralités

Les produits céréaliers constituent la base de l'alimentation humaine dans la plupart des pays du monde du fait qu'elles apportent la plus grande part calorique et protéique de la ration. Le terme céréale désigne selon le concept de la FAO : un ensemble de plantes qui sont principalement cultivées pour leurs grains secs riches en amidon. Elles procurent secondairement le fourrage, dans le cas où elles sont cultivées en vert c'est-à-dire avant la maturation des grains.

Les céréales regroupent le blé, le riz, le maïs, l'orge, l'avoine, le seigle et les mils (millets et sorghos) et le triticale (hybride de blé et de seigle). Elles appartiennent à la famille des Poacées, anciennement Graminées (**Tab.13, Fig.60**)

Tableau 13 : Famille des Poacées

Famille	Sous-famille	Tribu	Sous-tribut	Genre	Nom commun espèce
Gramineae	Festucoideae	Triticeae Aveneae	Triticineae	<i>Triticum aestivum</i>	Blé tendre
				<i>Triticum durum</i>	Blé dur
				<i>Secale</i>	Seigle
				<i>Ordeum</i>	Orge
				<i>Avena</i>	Avoine
	Oryzaceae		<i>Oryza</i>	Riz	
	Panicoideae	Tripsaceae		<i>Zea</i>	Mais
Andropogoneae			<i>Sorghum</i>	Sorgho	

➤ graminées ou poacées :

- ✓ blés (tendres, durs, petits et grands épeautres),
- ✓ seigle,
- ✓ triticale,
- ✓ riz,
- ✓ orge,
- ✓ avoine
- ✓ maïs
- ✓ mils (gros mils ou sorgho, petit mil ou millet) ;



➤ polygonacées : sarrasin ou blé noir ;

➤ chenopodiacées : quinoa (quechua)

➤ amarantacées : amarante

Figure 60 : Exemple de quelques plantes de la famille des Poacées

III.1. Céréales dans le monde

Les blés sont présentent partout dans le monde où 2 espèces sont particulièrement cultivées : le blé dur (*Triticum durum*) c'est le blé de semoulerie par excellence ; le blé tendre (*Triticum*

œstivum), T. vulgare, froment. La récolte de blé a lieu à différentes époques de l'année quelque part dans le monde : en mars en Inde, en mai en Chine, en juillet-août au USA et Europe, Algérie, en Canada, en hiver à l'Argentine et en Australie.

- Le riz c'est la culture céréalière la plus importante dans le monde en développement, il constitue la denrée alimentaire de base de plus de la moitié de la population du globe. Parmi les céréales, la production du riz est celle qui utilise la plus forte proportion de terre.

- Le maïs fournit des éléments nutritifs aux humains et aux animaux et sert de matière première à l'industrie pour la fabrication de l'amidon.

Les farines de céréales contiennent à côté de l'amidon des protéines de réserve insolubles dans l'eau, les prolamines et les glutenines que l'on ne trouve pas ailleurs, lorsqu'elles sont présentes en bonnes proportions, elles permettent l'obtention d'une pâte extensible (propriétés des prolamines) et élastique (propriétés des glutenines). Seules deux céréales se prêtent à la panification : le blé et le seigle, les autres céréales ont des emplois alimentaires variés, le plus commun c'est la préparation de boissons alcoolisées, mais les usages les plus courants des céréales concerne la cuisine soit directement en grain, soit en farine, soit en amidon ou en semoule.

III.1.1. Données économiques et production :

Pourquoi les céréales sont-elles revêtues et continuent-elles de revêtir une grande importance économique? Tous simplement parce qu'elles apportent sous un petit volume, une matière première très riche en calories, facilement transportable et conservable : elles constituent un aliment concentré.

III.1.1.2. Marché Mondial

Aujourd'hui les céréales sont considérées comme étant le pétrole jaune. Le blé vient en tête des productions céréalières et présente environ un tiers du total mondial. D'après les bulletins la production mondiale de céréales du atteindre un niveau record de 2.722 millions de tonnes en 2019". De plus, l'utilisation de céréales à l'échelle mondiale devrait atteindre un nouveau niveau record avec une hausse d'1,5 %. L'utilisation mondiale de blé devrait croître également dans les années prochaines, sous l'effet d'une offre abondante et de prix attractifs et en raison d'une progression attendue de 3,6 % de l'utilisation dans l'alimentation animale, qui pourrait se situer à un niveau encore jamais atteint de 146 millions de tonnes.

Les échanges mondiaux de céréales en 2019-2020 ont été environ 415 millions de tonnes, un niveau identique au mois précédent, Les exportations mondiales de blé en 2019-2020 (juillet/juin) ont rebondi de 3,4% (5,7 millions de tonnes) et ont atteint 173,5 millions de

tonnes, principalement en raison d'une hausse de la demande à l'importation au Maroc et dans les pays d'Asie. Les tableaux ci-dessus résument le marché mondial des céréales ainsi que les différents exportateurs de chaque type.

Tableau 14: Le marché mondial des céréales entré 2015/2020 en million de tonnes (FAO)

	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020
Production	2586,5	2663,2	2702,7	2653,4	2706,3
Disponibilité	3351,2	3455,3	3538,8	3531,8	3573,3
Utilisation	2553,4	2617,2	2654,6	2679,3	2713,7
Commerce	392,9	406,1	422,1	412,4	415,3
Stock	792,1	836,1	878,4	867,0	849,8

Tableau 15 : Principaux exportateurs des céréales

Toutes céréales (millions de tonnes)				
	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018
Production	2056	2016	2140	2100
Échanges	322	346	353	360
Consommation	2010	1986	2107	2104
Stocks	535	565	496	617

Principaux exportateurs : Argentine, Australie, Canada, États-Unis, Kazakhstan, Russie, Ukraine et UE

Tableau 16 : Principaux exportateurs du blé

Blé (millions de tonnes)				
	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018
Production	730	737	755	757
Échanges	153	166	176	174
Consommation	714	721	738	744
Stocks	207	244	241	254

Principaux exportateurs : Argentine, Australie, Canada, États-Unis, Kazakhstan, Russie, Ukraine et UE

Tableau 17: Principaux exportateurs du riz

Riz (millions de tonnes)				
	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018
Production	480	474	487	484
Échanges	41	39	44	44
Consommation	476	473	486	485
Stocks	122	123	124	123

Principaux exportateurs : États-Unis, Inde, Pakistan, Thaïlande et Viet Nam

Tableau 18 : Principaux exportateurs du maïs

Maïs (millions de tonnes)				
	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018
Production	1027	984	1088	1054
Échanges	125	136	138	147
Consommation	998	974	1047	1068
Stocks	284	295	335	322

Principaux exportateurs : Argentine, Brésil, États-Unis et Ukraine

III.1.1.3. Marché National

Durant la campagne 2016-2017: La superficie moissonnée a été de plus de 2,35 millions (ha), soit 91% de la superficie déclarée à moissonner qui est de près de 2,58 millions ha, contre plus de 2,2 millions ha durant 2015-2016 (**Fig.61**). La production céréalière :

- 34,3 millions qx en 2015-2016
- 34,8 millions qx 2016-2017

57% des productions céréalières obtenues sont constituées de blé dur plus de 20,03 millions qx, et 28% sont formées d'orge pour plus de 9,68 millions de qx.

L'Algérie est un grand importateur de blé car la céréaliculture nationale n'arrive pas à satisfaire la demande :

- Faute de rendements insuffisants ;
- Besoins de consommation sans cesse croissants ;
- Forte évolution démographique ;

Les importations Algériennes de céréales ont dépassé 2,11 milliards de dollar, durant les neuf premiers mois de 2019, contre plus de 2,40 milliards dollars au cours de la même période en 2018, en baisse de plus de 12%, De janvier à septembre 2019, les importations des céréales, qui ont représenté 34,15% de la facture globale des importations, ont enregistré ainsi une baisse de 290,34 millions de dollars, soit 12,06%, selon les données statistiques de la direction des études et de la prospective des Douanes (DEPD).

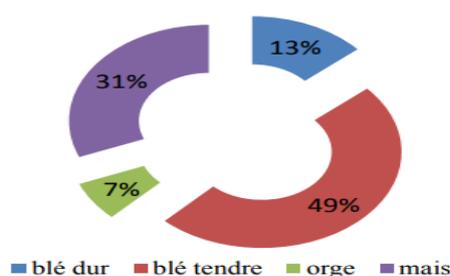


Figure 61: Cercle représentatif des différentes parts de céréales en quantités pour l'année 2016

III.1.1.4.1. Pays fournisseurs de l'Algérie en céréales

Blé tendre 2016: La France est le premier ainsi que le principal fournisseur de l'Algérie en blé tendre avec 3,8 millions de tonnes en 2016 et 3,9 en 2015, suivi de l'Allemagne avec 558 261 tonnes en 2016 et 975 787 tonnes en 2015 (Fig.62)

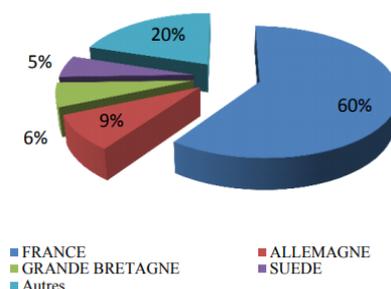


Figure 62: Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en blé tendre pour l'année 2016.

Blé dur 2016: Le principal fournisseur de l'Algérie ces deux dernières années est le Canada avec 1 082 687 tonnes en 2016 contre 770 230 tonnes en 2015. Suivi par le Mexique soit 556 538 tonnes en 2016 contre 598 443 tonnes en 2015 (Fig.63).

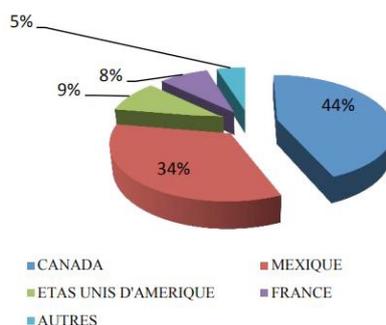


Figure 63: Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en blé dur pour l'année 2016.

Orge 2016 : Pour l'orge, le principal fournisseur de l'Algérie est la Grande Bretagne 265 838 tonnes en 2016 et la Fédération de Russie 233 265 tonnes en 2015 (Fig.64)



Figure 64: Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en orge pour l'année 2016.

Maïs 2016 : L'Argentine est le principal fournisseur de l'Algérie en maïs ces deux dernières années avec respectivement 2,7 millions de tonnes en 2015 et 2,5 millions de tonne en 2016 (Fig.65)

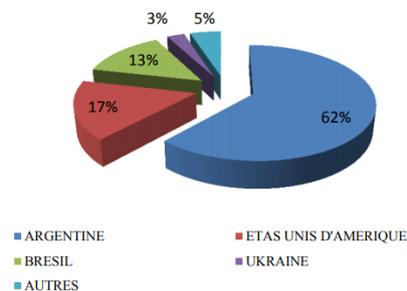


Figure 65 : Cercle représentatif des pays fournisseurs de l'Algérie en maïs pour l'année 2016.

III.2. Structure des grains :

Les grains ont une très grande diversité de forme, de taille ou de couleur. De forme sphérique, ovale, oblongue, ou parfois même polygonale, les grains de céréales ont, selon les espèces, des dimensions qui varient de moins de 1 mm (fonio) à plus de 10mm (maïs). Le poids de 1000 grains peut ainsi varier de 0,5 g (fonio) à près de 350 g (maïs).

III.2.1. Description du blé et du grain de blé

Le blé a une forme ovoïde et présente sur la face ventrale un sillon qui s'étend sur toute la longueur (Fig.66). A la base dorsale du grain, se trouve le germe qui est surmonté par une brosse. Le grain mesure : 5-7 mm de long, 2,5-3,5 mm d'épaisseur, poids 20 et 50 mg. La couleur de blé varie du roux au blanc.



Figure 66 : le blé et du grain de blé

III.2.2. Structure physique des grains de céréales

Les grains de céréales sont des fruits secs indéhiscents appelés caryopses qui ne contiennent qu'une graine. Ces organismes vivants sont de véritables plantes miniatures, protégées par des enveloppes et disposant de réserves pour se nourrir et se développer. Les grains sont constitués de trois parties : les enveloppes, l'albumen et le germe (Fig.67).

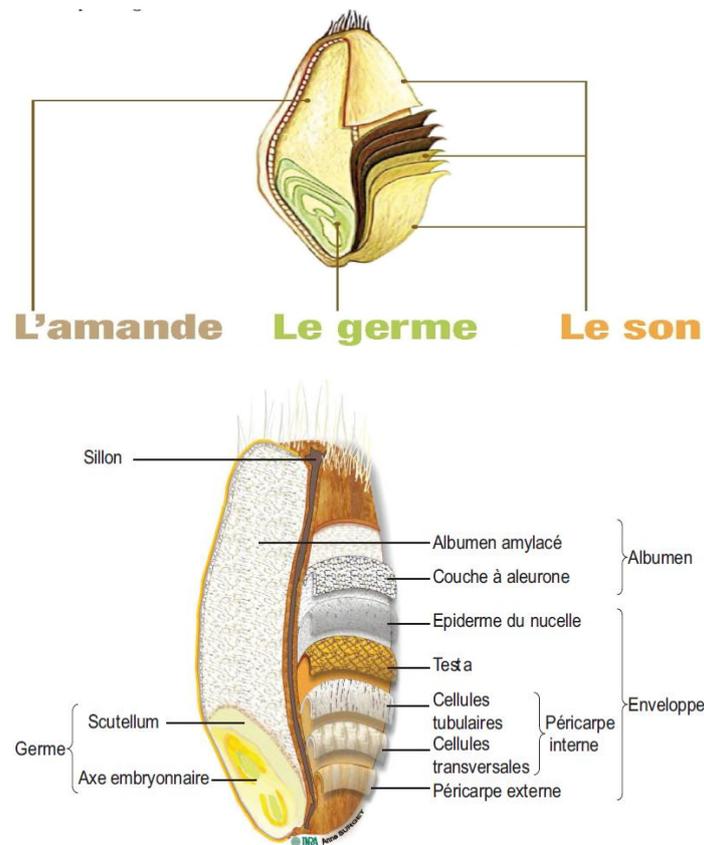


Figure 67 : Schéma histologique d'une coupe longitudinale d'un grain de blé

III.2.2.1. Enveloppes

Les grains de céréales sont protégés par une ou plusieurs enveloppes. Les couches cellulaires les plus externes constituent le péricarpe qui correspond aux téguments du « fruit ». Sur sa face interne, le péricarpe est souvent soudé à une couche cellulaire appelée testa qui correspond au tégument de la graine. Pour certains grains, comme le sorgho, cette testa est parfois fortement pigmentée et contient des tannins. Lors de la transformation des grains, les enveloppes, qui représentent environ 8 % du grain, donnent le son, substance riche en fibres, en minéraux, en vitamines et en protéines.

Par opposition aux céréales dites « nues » comme le mil, le sorgho, le maïs ou le blé, certaines céréales, telles que le riz ou le fonio, sont dites « vêtues » car elles possèdent encore certaines enveloppes externes provenant de la fleur. Ces enveloppes, appelées balles, sont constituées des glumelles et des glumes et ne sont pas intimement liées au grain comme peut l'être le péricarpe, mais elles améliorent sa protection comme dans le cas du riz paddy.

III.2.2.2. Albumen

L'albumen est l'amande des céréales et représente 75 à 90 % des grains. Comme principal tissu de réserve, il est essentiellement constitué de granules d'amidons enchâssés dans un

réseau protéique plus ou moins dense. La première couche cellulaire de l'albumen est l'assise protéique ou couche à aleurone, riche en protéines, en lipides et en minéraux. Certaines céréales, comme le maïs et le sorgho, possèdent un albumen vitreux et un albumen farineux. L'albumen vitreux est constitué de granules d'amidon noyés dans une matrice protéique pour former une structure dense et compacte (**Fig.68**). Dans l'albumen farineux, les granules d'amidon sont beaucoup plus libres et reliés par un mince réseau protéique discontinu.

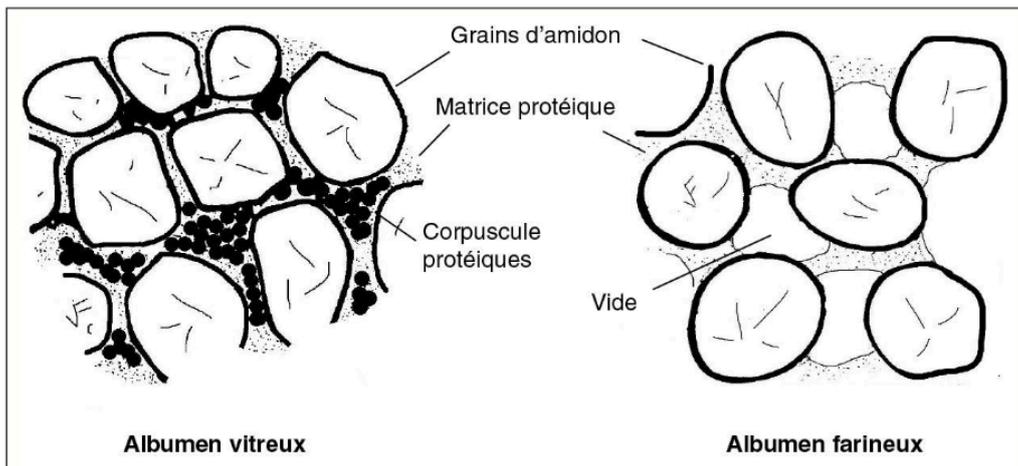


Figure 68 : Schéma de cellules de l'albumen

L'albumen du blé tendre est généralement farineux alors que celui du riz est essentiellement vitreux. L'albumen farineux apparaît opaque à la lumière en raison de la présence de vides d'air tandis que l'albumen vitreux est translucide. Lors de la transformation, les albumens farineux produisent des farines et les albumens vitreux donnent des semoules. Cependant, certaines variétés de blé tendre comme les blés « de force » peuvent être vitreuses et leur mouture en farine granuleuse demande alors plus de force mécanique. Par ailleurs, certains cherchent aujourd'hui à produire des farines de blé dur avec une granulométrie inférieure à 200µm pour pouvoir les utiliser en boulangerie, viennoiserie ou biscuiterie.

III.2.2.3. Germe

Le germe des céréales est formé de la plantule et d'un seul cotylédon (plante monocotylédone). La plantule est une véritable plante miniature et le cotylédon appelé scutellum est un organe, riche en protéines, en lipides, en protéines, en minéraux et en vitamines, qui permet à la jeune plantule de puiser les réserves de l'albumen pour se développer. L'importance relative du germe par rapport au grain varie suivant les céréales. Les germes du blé et du riz sont petits alors que ceux du sorgho, du maïs ou du mil sont très gros (**Fig.69**).

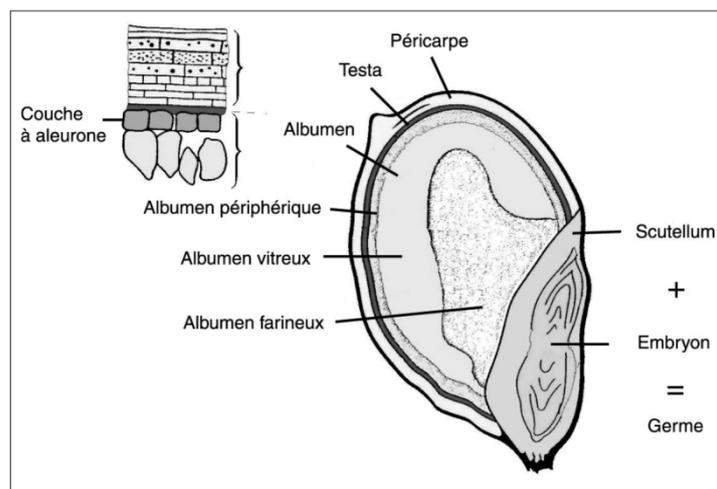


Figure 69 : Grain de sorgho

La proportion relative des différentes parties du grain pour plusieurs céréales est donnée dans le tableau ci-dessous

Tableau 19 : Comparaison des parties structurantes de plusieurs céréales (en % du grain entier).

Céréales	Germe	Albumen	Enveloppes
Mil	17	75	8
Maïs	11	83	6
Sorgho	10	82	8
Riz cargo	4	90	6
Blé	3	82	15

Une fois éliminé, le germe constitue une autre partie du son. En raison de leur grande richesse en lipides et notamment en acides gras insaturés, les germes sont parfois récupérés et pressés pour en extraire de l'huile utilisée en alimentation (huile de germe de maïs) ou en industrie pharmaceutique ou cosmétique.

III.2.3. Composition biochimique des grains

Les grains sont constitués de matière sèche (glucides, protéines, lipides, vitamines et matière minérale) et d'eau (**Tab.20**).

Tableau 20 : Composition biochimique succincte de diverses céréales (grains nus)

Céréales	Glucides (% MS)	Lipides (% MS)	Protides (% MS)	Matières minérales (% MS)
Blé	75	2,0	12,5	1,7
Maïs	83	4,5	11,0	1,3
Mil	83	4,0	12,0	1,2
Sorgho	84	3,5	11,0	1,2
Fonio décortiqué	85	3,5	10,0	1,1
Riz cargo	86	2,5	10,0	1,4

III.2.3.1. Glucides

Les glucides sont les composants majoritaires et représentent 75 à 85 % de la matière sèche (**Tab.21**). Ils sont présents principalement dans l'albumen des céréales sous la forme de granules d'amidon polyédriques, sphériques ou réniformes dont la taille varie de 2 à 5 μm (riz) à plus de 40 μm (certaines légumineuses). L'amidon est un polymère du glucose (sucre simple) dont la forme principale est l'amylopectine, composée de nombreuses chaînes ramifiées, alors que l'amylose est formée d'une chaîne continue de glucose. L'amylose représente en général 18 à 28% de l'amidon des céréales. Certaines variétés de céréales ne contiennent pas d'amylose comme c'est le cas des riz gluants ou des maïs cireux dits *waxy*. Les glucides sont également présents sous la forme de fibres, non digestibles sauf par les herbivores, et de sucres simples (saccharose, glucose) en faibles quantités. Dans le blé l'amidon est le glucide principal trouvé dans l'albumen, les sucres (oses, dioses et trioses) sont présents dans le germe, et les glucides des enveloppes sont principalement ; la cellulose et l'hémicellulose, les pentosanes, et la lignine (**Tab.21**).

Tableau 21: Distribution des glucides dans les fractions de blé (g/100 grs)

Glucides	Albumen	Germe	Enveloppes
Amidon	95,8	31,5	14,1
Sucres	1,5	36,4	7,6
Cellulose	0,3	16,8	35,2
Hémicellulose	2,4	15,3	43,1

III.2.3.2. Lipides

Les lipides appelés couramment matières grasses, sont peu abondants et inégalement distribués dans le grain, ils sont principalement concentrés dans le germe des céréales et représentent que 3 à 4 % de la matière sèche (**Tab.22**). Les principales matières grasses du blé

sont des acides gras insaturés, des glycérides simples des glycolipides et des phospholipides riches en acides gras saturés, localisés dans le germe et les enveloppes. Ces substances influent sur la valeur boulangère des farines en exerçant une action dépressive qui modifie la cohésion physique du gluten, provoquant aussi des phénomènes de vieillissement de la farine. Sous l'action de la lipase, les triglycérides se transforment en acides gras, ce qui entraîne une diminution du pH ce qui va exercer une influence néfaste sur les propriétés plastiques des protéines de la farine.

Tableau 22 : La composition en acides gras des lipides des grains de blé (en pourcentage du total des acides gras)

Acide gras	Acide palmitique C ₁₆ (saturé)	Acide oléique C ₁₈ insaturé à une double liaison	Acide linoléique C ₁₈ insaturé à deux doubles liaisons	Acide linoléique C ₁₈ insaturé à trois doubles liaisons
Teneur en %	18	15	63	4

III.2.3.3. Protides et protéines

Les protides sont des composés azotés simples (acides aminés) ou formés de l'association plus ou moins complexe des acides aminés (protéines et peptides). Les céréales sont relativement pauvres en protéines (environ 10 %) ; en certains acides aminés comme la lysine alors que les légumineuses sont déficientes en acides aminés soufrés. Pour équilibrer l'apport nutritionnel, il est fréquent d'associer une céréale et une légumineuse dans les plats traditionnels de nombreux pays du Sud où le régime alimentaire fait largement appel aux protéines végétales : maïs et haricot en Amérique latine, riz et soja en Asie, blé et pois chiches en Afrique du Nord, etc. En plus du rôle nutritionnel, les protéines jouent le rôle de charpente de la pâte, elles sont les seuls responsables à la fois de l'extensibilité, tenacité, élasticité et cohésion de la pâte.

Par ailleurs le blé est considéré comme une source importante de protéines pour l'alimentation humaine, notamment le gluten qui est le plus important de point de vue quantitatif (80-85%) des protéines totales que technologique. Les grains de blé renferment un grand nombre de protéines : des protéines de structure, protéines biologiques actives et des protéines de réserve. Ces protéines ne sont pas réparties dans le grain de blé uniformément, elles sont surtout localisées dans le germe et l'assise protéique.

III.2.3.4. Vitamines et matières minérales

Les vitamines sont des composés chimiques complexes, essentiels à l'Homme et aux animaux. Les vitamines B des céréales sont surtout concentrées dans le péricarpe et le germe à des teneurs très faibles et sont généralement éliminées lors du décorticage des grains. Les grains renferment une quantité importante de vitamines du groupe B (B₁, B₂, B₅, PP, B₆) à l'exception de la vitamine B₁₂ (Tab.23, 24). La teneur en vitamines liposolubles des gains est faible. Les grains sont dépourvus de vitamines D et A. Seul le germe présente une richesse relative en vitamine E. Les variations dues aux traitements technologiques sont beaucoup plus marquées parce que certaines vitamines sont très sensibles à la chaleur.

Tableau 23 : Vitamines présentes dans le blé

Vitamines	Hydrosolubles					Liposolubles
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₆	B ₉	E
Quantité dans 100 g de blé	0.4 mg	0.1mg	4.7mg	0.5mg	50µg	2.5mg

Dans les grains, les vitamines sont surtout concentrées au niveau du germe et des enveloppes. Lors de la mouture une partie sera donc perdue dans les sons

Tableau 24 : Distribution de la vitamine du groupe B (g/100g) dans les différentes parties du grain de blé

	Thiamine (B ₁)	Niacine (B ₃)	Riboflavine (B ₂)	Acide pantothénique
Péricarpe, testa	1	4	5	8
Couche à aleurone	31	84	37	39
Albumen	3	11.5	32	41
Scutellum	62.5	1	14	4
Embryon	2	1	12	3.5

Les minéraux formant une petite partie du grain de blé, et en proportion encore plus faible dans l'albumen moins de 1 %. Le blé contient du fer, du magnésium, du Manganèse, du Cuivre et du zinc. Ces constituants sont distribués principalement dans les couches extérieures et dans le germe (Tab.25, 26).

Tableau 25 : Minéraux présents dans le blé

Les minéraux	Calcium	Phosphore	Magnésium	Sodium	Potassium	Fer	Zinc
Quantité dans 100 g de blé en mg	35	400	140	3	435	5	4

Tableau 26: Eléments minéraux repartis dans les différentes parties du grain de blé

	Grain entier	Germe	Albumen	Couche à aleurone
Total(%)	0,42	1,66	0,11	1,39
Zn (ppm)	40,4	222	14,1	119
Fe (ppm)	54,6	235	21,5	186
Mn (ppm)	56,4	402	8,80	130
Cu (ppm)	4,25	18	2,8	12
Ca (ppm)	335	1760	173	730
Mg (%)	0,15	0,54	0,02	0,58
K(%)	0,37	0,91	0,12	1,10

III.2.3.5. Eau

L'eau est toujours présente dans les grains à une teneur plus ou moins élevée selon le degré de séchage qu'ils ont subi. Elle est associée aux grains sous différentes formes (**Fig.70**)

- l'eau de constitution très fortement liée aux molécules (teneur entre 0 et 5%);
- l'eau plus ou moins adsorbée qui devient solvante au-delà d'un certain seuil (point critique à 13%) et joue alors un rôle biologique important en favorisant les réactions du métabolisme et les attaques des moisissures (teneur entre 5 % et 27 %) ;
- l'eau d'imprégnation ou eau libre aux très fortes humidités (teneur supérieure à 27 %).

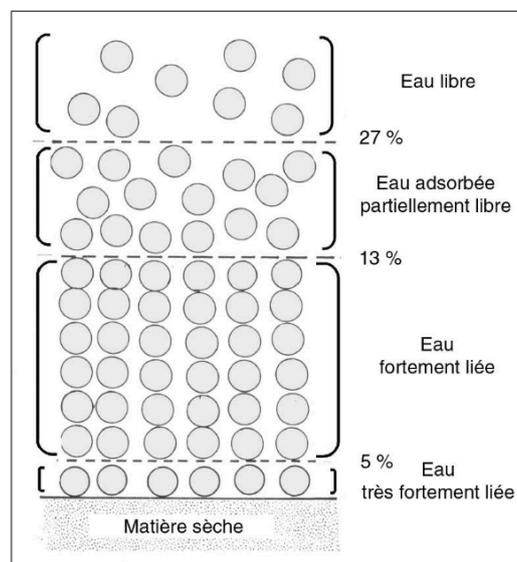


Figure 70. Schéma de fixation de l'eau dans un grain de céréale

III.2.3.6. Enzymes

Les enzymes sont aussi des substances complexes présentes en quantité négligeable mais dont le rôle est très important : ils sont responsables des transformations que subissent les autres substances (hydrolyse de l'amidon et des protéines, destruction des sucres simples et des

acides aminés). Les enzymes les plus courantes sont les amylolytiques, les pentosanases et les lipases. Les enzymes des grains de blé sont des protéines qui exercent une activité catalytique spécifique d'un très grand nombre de réactions chimiques. Leur fonctionnement est contrôlé par des principaux facteurs du milieu tels que la température, le pH et l'activité de l'eau.

III.3. Transformation industrielle des plantes céréalières :

La transformation du blé tendre et dur (**Tab.27**), comporte trois types d'activités, à savoir :

- La trituration de grains par les semouleries-minoteries ;
- La deuxième transformation (pâtes, couscous, biscuits, pain et viennoiseries) ;
- La troisième activité de valorisation des sous-produits par l'industrie des aliments de bétail.

Cette dernière activité incorpore le son et aussi l'orge. La transformation du blé tendre produit la farine, c'est le secteur de la meunerie. La transformation du blé dur, quant à elle, produit la semoule, c'est le secteur de la semoulerie.

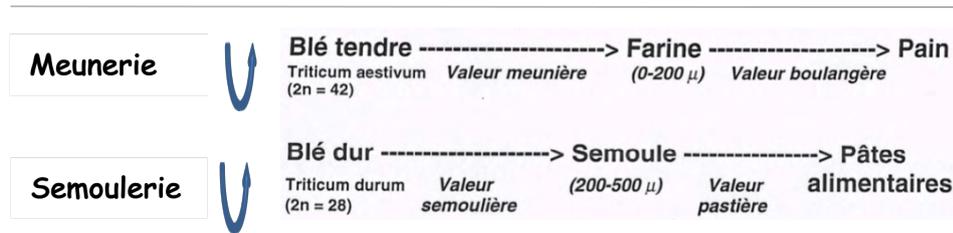
Tableau 27 : Différences entre les deux espèces de blé

	Blé tendre	Blé dur
Différences entre les deux espèces de blé:		
Nom scientifique	<i>Triticum aestivum</i>	<i>Triticum durum</i>
Forme du grain	Gros et rond	Ovale et long
L'endosperme	Blanc et doux	Jaune et dure
Gluten (protéine)	Long et élastique	Court et fort
Propagation	Très propagé autour du monde	Limité aux pays ensoleillés
Utilisations	panification, la pâtisserie, la biscuiterie	Pâtes alimentaires, couscous et pains traditionnel

La transformation du blé a pour objectif principal de le rendre plus apte (aspects nutritionnels, sécurité alimentaire, praticité, etc...) et plus agréable à la consommation humaine tout en assurant une aptitude à la conservation

III.3.1. Procédés de meunerie et de semoulerie : Il comprend trois étapes :

- La réception
- Le nettoyage
- La préparation (conditionnement/mouillage)



III.3.2. Réception du blé

Après réception au magasin de blé du moulin, le blé est conservé à des boisseaux à blé sale, les différents blés arrivant au magasin sont mélangés dans ces boisseaux afin de fabriquer par la suite une farine bien équilibrée et de qualité.

▪ La pesée

A la sortie de ces boisseaux, le blé est pesé au moyen d'une bascule automatique, la benne de cette bascule peut contenir 5 à 100 kg de blé et se remplit et se vide alternativement. Un compteur automatique permet d'enregistrer la quantité de blé sale destinée à la mouture, ce qui nous permet de faire calcul de taux d'extraction et de connaître le taux d'impuretés par différence avec les résultats enregistrés à la deuxième bascule après nettoyage. Le blé pesé est dirigé vers la première machine de nettoyage (séparateur-aspirateur).

III.3.2. Nettoyage des grains

Quels que soient les modes de récolte et de battage, les grains en vrac ou en sacs sont généralement contaminés par des impuretés. Ces divers contaminants sont de nature végétale (pailles, feuilles, gousses, graines étrangères, balles, sons), animale (insectes, fèces) ou minérale (cailloux, sable, terre, objets métalliques).

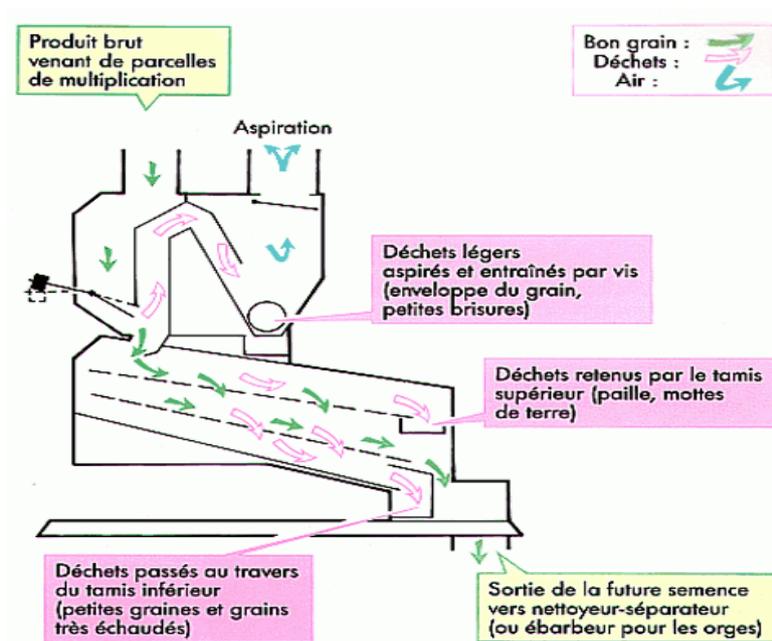


Figure 71: Schéma du nettoyage des grains

Ces derniers doivent être éliminés pour permettre un bon stockage ou obtenir un produit transformé de qualité (Fig.71). Par ailleurs, les matières minérales, généralement plus dures, entraînent une usure prématurée des machines de transformation.

III.3.2.1. Nettoyeurs industriels

Au niveau des centres de stockage et des industries de transformation, le nettoyage est réalisé par des équipements de type industriel qui sont généralement placés dans la tour de manutention et alimentés en dérivation du circuit des grains. Les principales machines de nettoyage sont diverses (Tab.28) mais leur fonctionnement repose sur l'un ou l'autre des principes suivants :

- Séparation dimensionnelle ou densimétrique,
- Nettoyage des surfaces,
- Triage colorimétrique,
- Magnétisme.

Tableau 28 : Principales machines de nettoyage des blés avant broyage

Type de machine	Principe physique	Impuretés éliminées
Aimant	Champ magnétique	Métaux
Aspirateur	Densité et résistance à l'air	Pailles, glumes
Nettoyeur-séparateur et trieur	Forme et dimension	Grosses et petites impuretés
Epierreur	Densité	Pierres
Brosse, épointeuse, lavage	Nettoyage en surface	Poussières adhérentes
Table densimétrique	Densité	Pierres, blés ergotés
Toboggan	Force centrifuge	Petites graines
Trieur de couleur	Couleur	Grains avariés

Les systèmes de nettoyage diffèrent d'un moulin à un autre :

- La nature des machines mises en œuvre ;
- L'ordre des opérations.

Ces nettoyeurs ont en commun de posséder (Fig.72) :

- Un régulateur de flux destiné à assurer un débit constant des produits arrivant sur la première machine,
- Un système d'aspiration pour éliminer les impuretés les plus légères (paille),
- Des machines de calibrage et de triage afin de séparer les blés des grosses et petites graines étrangères,
- Épointeuse ou brosse pour nettoyer la surface des blés,

- Épierreuse et d'un séparateur magnétique.

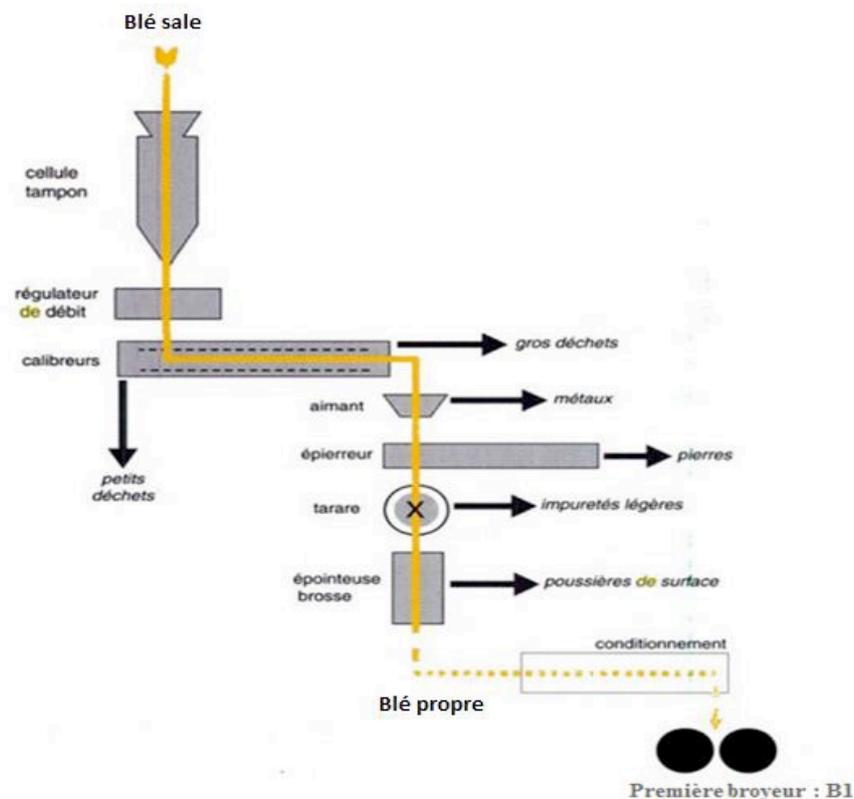


Figure 72 : Diagramme type de nettoyage des blés

III.3.2.2. Tarare

Le tarare est un nettoyeur constitué de grilles superposées, animées d'un mouvement alternatif. La grille supérieure retient les grosses impuretés alors que la grille inférieure laisse passer les particules très fines comme les sables. Les bons grains sont récupérés entre les deux grilles qui sont traversées par un courant d'air, généré par un ventilateur, pour éliminer les impuretés légères (Fig.73).

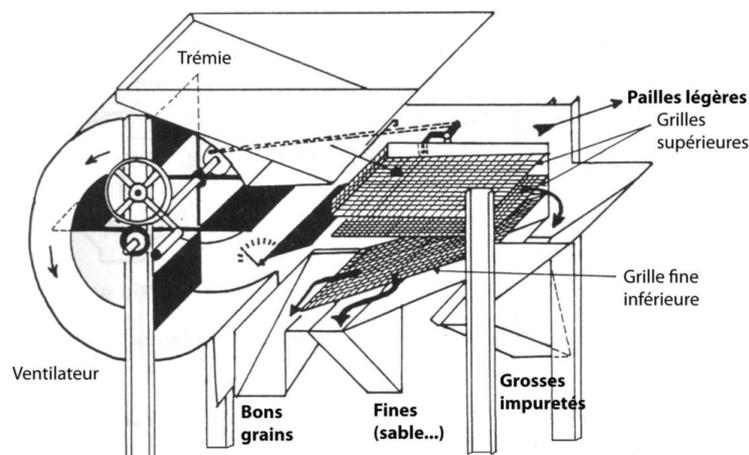


Figure 73 : Schéma d'un tarare

Le débit peut atteindre 500 kg à 1 t/h à un régime de manivelle de 60 tr/min. Le tarare est polyvalent et fonctionne correctement même si les produits sont très sales et chargés en pailles. Il est cependant relativement fragile en raison du mouvement de va-et-vient des grilles. Certains lui préfèrent les nettoyeurs rotatifs plus robustes.

III.3.2.3. Nettoyeur-séparateur

Le nettoyeur-séparateur est l'équipement le plus fréquemment utilisé pour le nettoyage des grains dans les grands centres de stockage et les industries de transformation. Le but principal de cet appareil est d'enlever la poussière à 90% et éliminer les autres impuretés à 70-80%. Comme le tarare, il est schématiquement constitué de deux grilles planes animées d'un mouvement alternatif et traversées par un courant d'air (**Fig.74**).

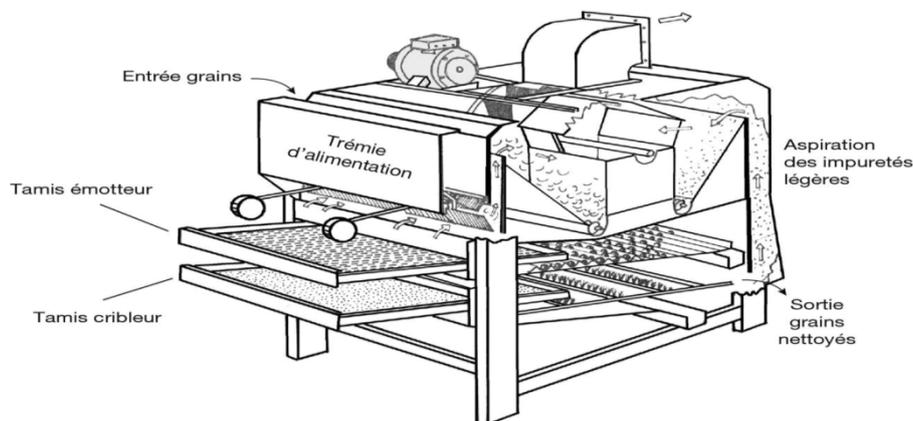


Figure 74 : Schéma et exemple d'un nettoyeur-séparateur

Les grains sont introduits dans une trémie d'alimentation pour être distribués en nappe régulière sur toute la largeur de l'appareil. Dès la sortie de la trémie d'alimentation, une première aspiration entraîne les impuretés légères. La grille supérieure ou tamis émotteur retient les grosses impuretés alors que la grille inférieure (ou tamis cribleur) laisse passer les impuretés fines et lourdes comme les sables ou les fines brisures. Un dispositif de dégommage (boules caoutchouc, brosses) est prévu pour débarrasser les grilles des particules qui restent

prisonnières dans les perforations. Les bons grains sont toujours récupérés entre les deux grilles. À la sortie des grains propres, une seconde aspiration élimine les fines impuretés légères restantes. Le choix des tailles de perforation des grilles est fonction du type de grains à nettoyer. Les débits des nettoyeurs-séparateurs industriels sont couramment de 5 à 25 t/h. Des débits supérieurs permettant d'atteindre plusieurs dizaines de tonnes à l'heure sont obtenus avec des nettoyeurs équipés de deux caissons de grilles en parallèle.

III.3.2.4. Tables densimétriques :

Les grains sont soumis à une aspiration d'air tout en étant entraîné par un mouvement de va-et-vient le long d'une table vibratoire et inclinée (Fig.75). Les produits se répartissent en plusieurs couches.

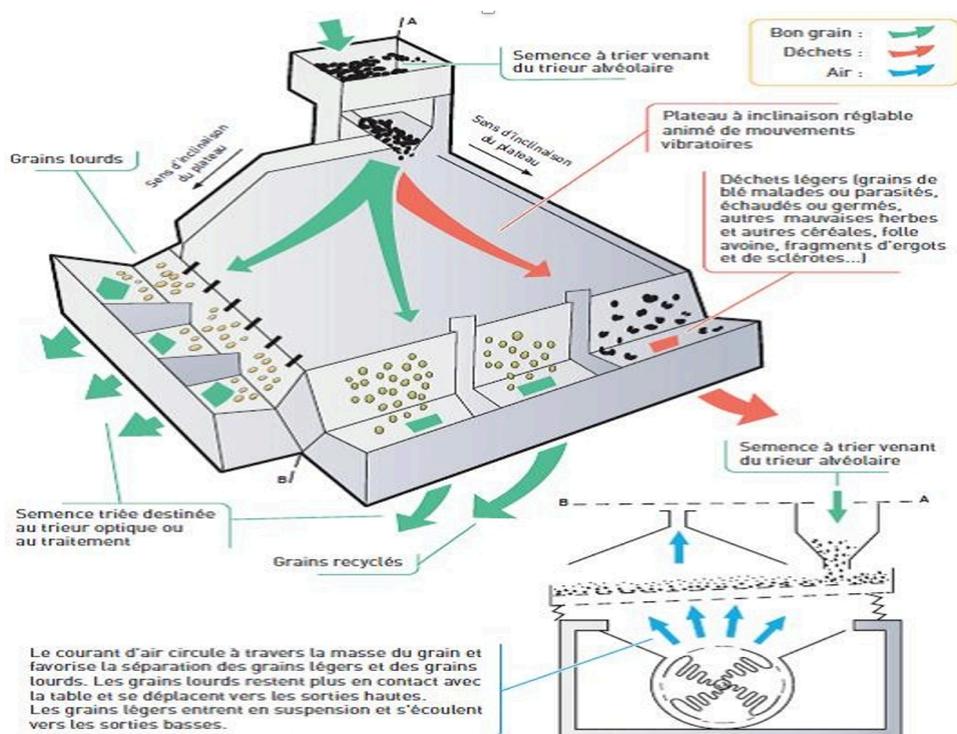


Figure 75 : Les tables densimétriques

La table densimétrique permet de trier les grains de formes et de dimensions voisines mais de poids spécifique légèrement différent grâce aux quatre réglages :

- Vitesse de vibration ;
- Inclinaison latérale ;
- Inclinaison longitudinale ;
- Puissance de la soufflerie.

III.3.2.5. Nettoyeur rotatif

Les trieurs, les produits sont séparés sur la base de leur plus grande dimension. A cet effet des appareils à alvéoles sont utilisés : cylindres rotatifs intérieurement. Le nettoyeur rotatif industriel est plus sophistiqué que le crible artisanal car le nettoyage des grains est effectué à deux niveaux. Tout d'abord, à l'entrée des grains dans la machine, un ventilateur permet d'éliminer les particules légères puis les grains tombent dans un crible rotatif incliné, généralement formé de trois cylindres qui séparent les différents éléments selon leur taille (**Fig.76**). Le premier cylindre à mailles fines permet de récupérer les impuretés fines comme les sables, le deuxième cylindre peut permettre de récupérer les brisures, le troisième cylindre récupère le bon grain, tandis que les impuretés grossières sont évacuées en bout de crible. Différentes combinaisons sont possibles selon le choix des perforations de grilles. Selon le nombre et le diamètre des cylindres, les débits de nettoyage varient de 5t/h à plusieurs dizaines de tonnes à l'heure.

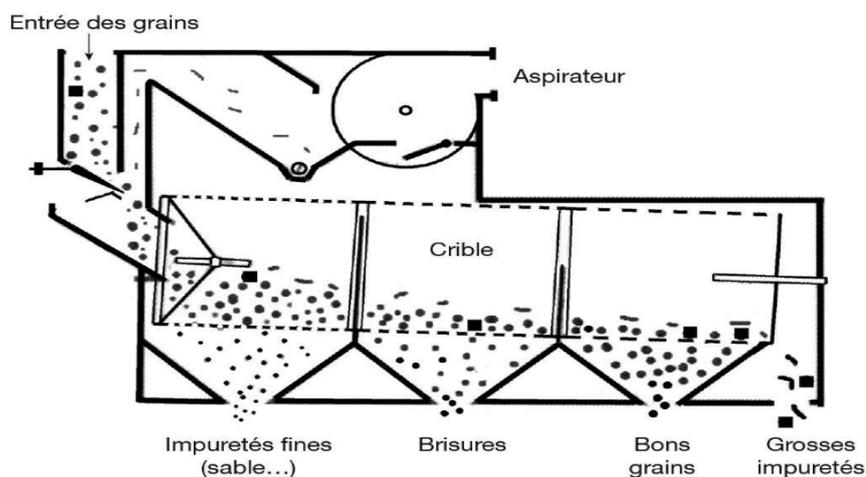


Figure 76. Schéma de nettoyeur rotatif

- Le triage a pour but d'enlever du blé les impuretés qui ont le même diamètre de celui-ci mais de longueur différente, soit plus courte tel que les grains ronds, vesces, nielles ; soit plus long tel que les grains d'avoine et d'orge. Il y a deux types de trieurs : à grain long et à grain rond. Le trieur est constitué par un cylindre en tôle portant sa surface intérieure des alvéoles dont la forme et la taille varient avec le genre de triage à effectuer. Il fonctionne légèrement incliné et tourne plus ou moins lentement ce qui permet le déplacement des grains qui restent au fond du cylindre. Le cylindre en tournant entraîne des grains logés dans les alvéoles jusqu'au moment où, sous l'action de la pesanteur, ils tombent dans un auget fixe qui les recueille ou bien tombent au fond du cylindre selon la longueur du grain.

Exemple : Si le trieur est destiné à éliminer les grains ronds, les alvéoles auront la taille de ces grains, dans ce cas les grains de blé nettoyés restent au fond du cylindre car ils se détachent des alvéoles plutôt que les grains ronds qui eux tombent dans l'auget.

III.3.2.6. Autres nettoyeurs et nettoyages :

- Les toboggans :

Ils assurent la séparation des produits en fonction de leur masse. Le lot à nettoyer descend par gravité une rampe hélicoïdale : ses composantes sont soumises à une force centrifuge, les produits les plus lourds sont entraînés vers la périphérie. On sépare ainsi les blés cassés des petites graines.

- Le magnétique :

A la sortie du séparateur-aspirateur, le blé passe par un dispositif appelé « magnétique », ceci soit un aimant ou un électro-aimant. Il retire du blé les corps métalliques qui seraient passé avec celui-ci à travers les tamis des séparateurs. L'efficacité de la séparation des corps métalliques dépend de :

- La force magnétique de l'aimant ou de l'électro-aimant ;
- La vitesse de blé ;
- L'épaisseur de la couche de blé.

- Le brossage :

Le but est d'enlever les poussières qui se trouvent dans la brosse du blé et dans le sillon et d'éliminer les couches externes de l'enveloppe. Cette opération est réalisée par des brosses à blé.

- Nettoyage humide (lavage) :

Son but est d'éliminer toutes les poussières et les impuretés plus lourdes et plus légères que les grains de blés. Il permet aussi d'enlever la poussière qui se trouve dans le sillon et qui n'a pas été enlevée par l'opération de brossage. Le lavage est effectué grâce à une laveuse-essoreuse qui est composée de deux parties, un bac de lavage et une colonneessoreuse.

Le blé est déversé dans le bac de laveuse et brassé dans l'eau par une vis d'Archimède, les pierres et le sable plus lourds tombent au fond du bac, ils sont évacués sous forme de boue. Par contre, les déchets légers flottent en surface, ils sont donc éliminés à la sortie de la laveuse. Le blé passe dans l'essoreuse par un système de batteur, il est remonté au sommet de l'essoreuse, une force centrifuge évacue ainsi une grande partie de l'eau superficielle qui mouille les grains.

III.4. Conditionnement

III.4.1. Meunerie

Après l'avoir nettoyé, des trieurs permettent de ne conserver que les grains de blé purs. Les grains de blé sains sont humidifiés pour faciliter la séparation de l'amande de ses enveloppes et reposent de 24 à 48 heures dans des boisseaux à blé propre avant d'être moulus :

- **Le conditionnement à froid:** tremper le blé dans l'eau froide pendant 1-3 jours avec une humidité de 18%.
- **Le conditionnement à chaud :** tremper le blé dans l'eau à une température de 46 °C/ 60- 90 min et à le laisser reposer pendant 24-48h.

Cette opération répond à un double objectif :

- Assouplir l'écorce du grain et faire en sorte que son humidité soit légèrement supérieure à celle de l'amande en vue de faciliter leur séparation ;
- Amener l'amande farineuse dans un état physique tel que sa réduction en farine fine soit obtenue le plus rapidement possible.

- Si le conditionnement résulte en un niveau élevé d'humidité ou si le blé est trop humide après purification, il est possible d'éliminer l'eau à l'aide de sècheurs sous vide.

- En conditionnement optimum, l'enveloppe a une humidité légèrement supérieure à celle de l'amande, elle devient élastique et pendant le broyage, elle se sépare facilement sous forme de lambeaux. L'amande par contre devient plus fragile ce qui permet de diminuer la demande d'énergie pour le broyage et de raccourcir le temps de la mouture. Le conditionnement peut avoir lieu dans des boisseaux de repos ou dans des conditionneurs- sècheurs.

III.5. Mouture du blé

La mouture est le premier procédé de transformation des céréales (**Fig.77**)

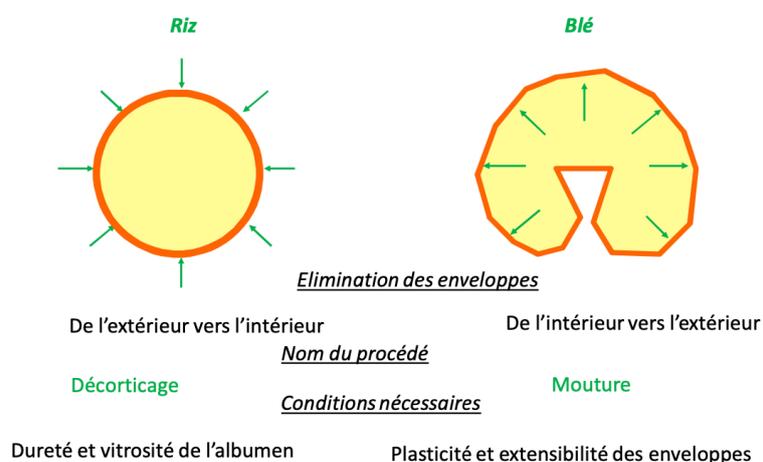


Figure 77: Première transformation des céréales

III.5.1. Principes de la mouture :

- 1) Broyer progressivement le grain de telle sorte que les enveloppes de celui-ci seront les moins brisés possibles ;
- 2) Nettoyer la face interne de ces enveloppes en essayant au maximum de garder leur intégrité;
- 3) Assurer progressivement la réduction des semoules plus ou moins vêtues provenant du broyage en évitant au maximum celles des enveloppes présent sur ces produits

Au cours de la mouture, deux sortes de produits granulés sont récupérés, appelés « série blanche » et « série bise ». Le produit de la série blanche contient plus d'éléments de l'amande que des enveloppes ; par contre celui de la série bise contient plus de fragments de l'enveloppe que d'amande.

La mouture du blé est définie par le taux d'extraction T.E :

$$\text{T.E} = \text{Poids de la farine extraite} / 100\text{g de blé mise en œuvre.}$$

Les opérations unitaires de la mouture sont résumées dans la figure 78 et 79.

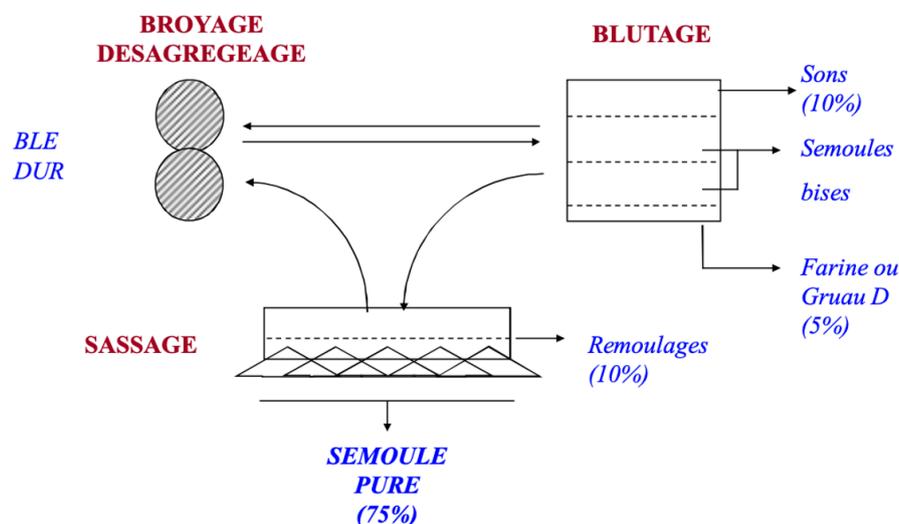


Figure 78 : Opérations Unitaires de Mouture

1.5.2. Transformation du blé tendre en farine

On distingue différentes phases de la mouture du blé tendre en farine (**Fig. 79**)

- Chacune de ces étapes représente plusieurs passages de blé dans les machines ;
- Le produit de chaque passage successif est tamisé selon sa taille.

- ✓ À la fin des opérations, la farine contient encore un faible pourcentage de matières minérales issues de l'enveloppe et de débris du germe qui déterminent le taux de cendres réglementaire.



Figure 79 : Etapes de la mouture du blé tendre en farine

III.5.2.1. Broyage

C'est la première opération de la mouture et a pour but d'écraser les grains et les fractions contenant plus d'enveloppe que d'amande (Fig. 80).

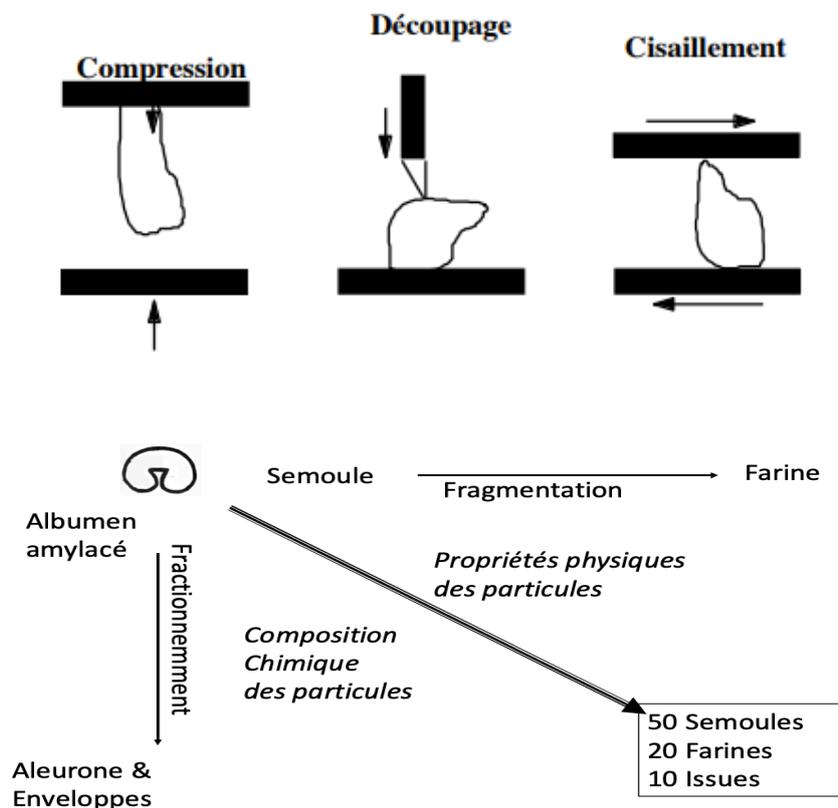


Figure 80 : Principe de fonctionnement du broyage et produits de la mouture : diversité et variabilité

Il est réalisé par des cylindres cannelés. Le grain passe entre de gros cylindres métalliques (Fig. 81). De multiples passages dans ces cylindres aux cannelures de plus en plus fines permettent de séparer l'enveloppe et l'amande.

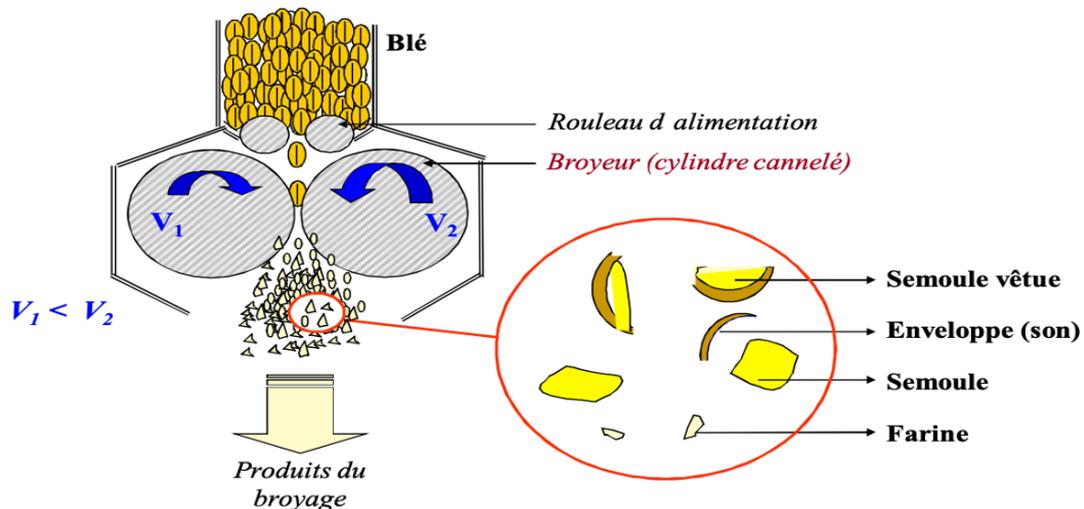


Figure 81 : L'appareil à Cylindres

III.5.2.2. Blutage

Le tamisage ou blutage permet de séparer les produits en provenance de cylindres cannelés après chaque broyage en fonction de leur granulométrie (Fig.82).

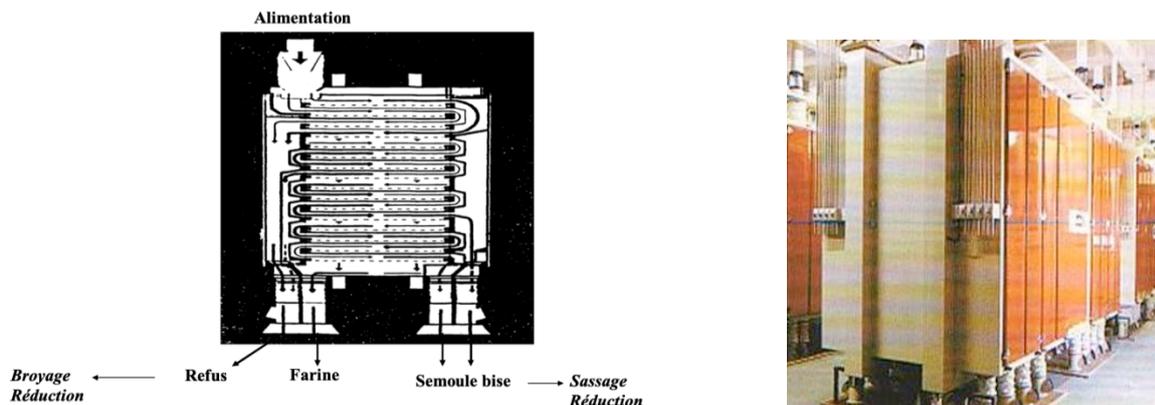


Figure 82 : Tamisage des produits de la mouture

L'opération est réalisée le plus souvent dans des plansichters: appareil formée d'un assemblage de tamis superposés et soumis à un mouvement rotatif (Fig.83). Ce qui passe à travers le tamis constitue l'extraction et ce qui reste sur le tamis constitue le refus. Le Plansichter est généralement constitué de deux grandes caisses comprenant chacune sur le plan vertical un, deux ou trois compartiments sur lesquels se trouve 10 à 12 tamis superposés, chaque compartiment représente un dispositif de blutage indépendant de celui-ci de

compartiment voisin ce qui permet d'envoyer simultanément des produits différents sur le même appareil.

Pour les céréales différents tissus sont utilisés pour les tamis des Plansichters :

- Tissus métalliques qui servent à classer les plus gros produits de broyage (Nickel, acier étamé, acier inox ou du bronze phosphoreux) ;
- Tissus en gaze utilisés pour classer les plus fines semoules, les finots et les farines. (gaze de soie, mélange de soie et coton ou en polymère plastique : nylon).

Les numéros attribués aux tissus métalliques correspondent au nombre de mailles contenues dans un pouce métrique ($1 = 27.77 \text{ mm}$). L'ouverture des mailles varie avec le nombre des mailles et la grosseur des fils. Si la distance d'axe en axe de deux fils voisins reste la même, le numéro du tamis restera le même mais l'ouverture diminue si la grosseur du fil augmente. On classe généralement les gazes selon deux numérotations: Française et Suisse.

♣ La Française correspond au nombre de mailles contenues dans un pouce parisien (27.07 mm).

♣ La Suisse comporte quatre catégories : prima, x, xx, xxx. La grosseur des fils augmente avec le nombre de x. Exemple :

- 13 xx ouverture = $100 \mu\text{m}$.

- 13 xxx ouverture = $95 \mu\text{m}$.

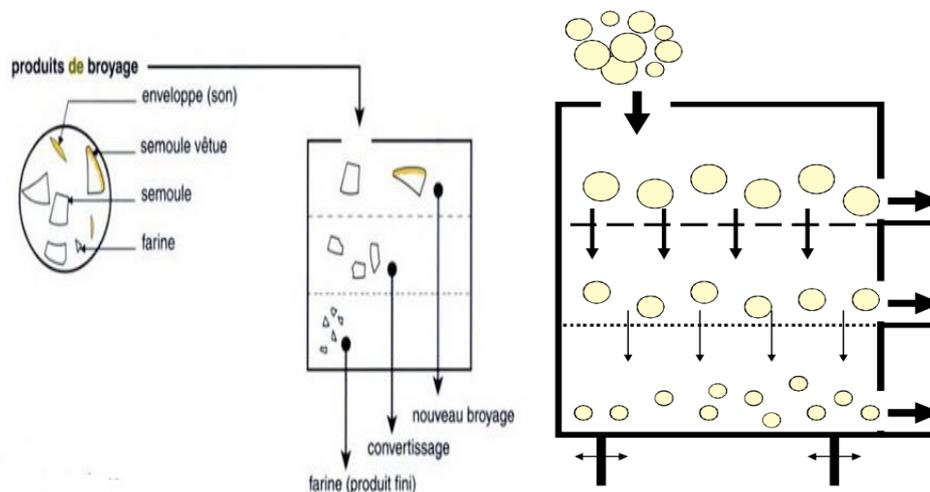


Figure 83: Principe de tamisage dans les plansichters

III.5.2.3. Claquage et convertissage

Se sont les deux phases de réduction des produits provenant du broyage. Ils sont destinés à réduire les particules de la série blanche. Les claumeurs et les convertisseurs sont des appareils à cylindres lisses (**Fig.84**). Dans le cas du claquage, les semoules et les refus (morceaux

d'amande trop dur) passent entre ces cylindres et sont broyés en particules encore plus fines et donc réduit en farine entière.



Figure 84 : Le claqueur et le convertisseur

- Le convertissage est l'ultime opération de l'obtention de la farine. C'est aussi le mélange des différentes farines obtenues à chaque étape de la mouture (farine de broyage, de claquage et de convertissage) qui donne la farine panifiable utilisée par le boulanger (farine entière).

III.5.2.4. Sassage

C'est une opération intermédiaire entre le broyage et la première phase de réduction des produits de claquage. Son but est de purifier et classer les produits allant au claquage. Le sassage assure la séparation des produits de la mouture qui seront maintenus en suspension par un courant d'air ascendant au-dessus de tamis et la largeur de maille diminue au fur et à mesure de la progression des produits (Fig.85).

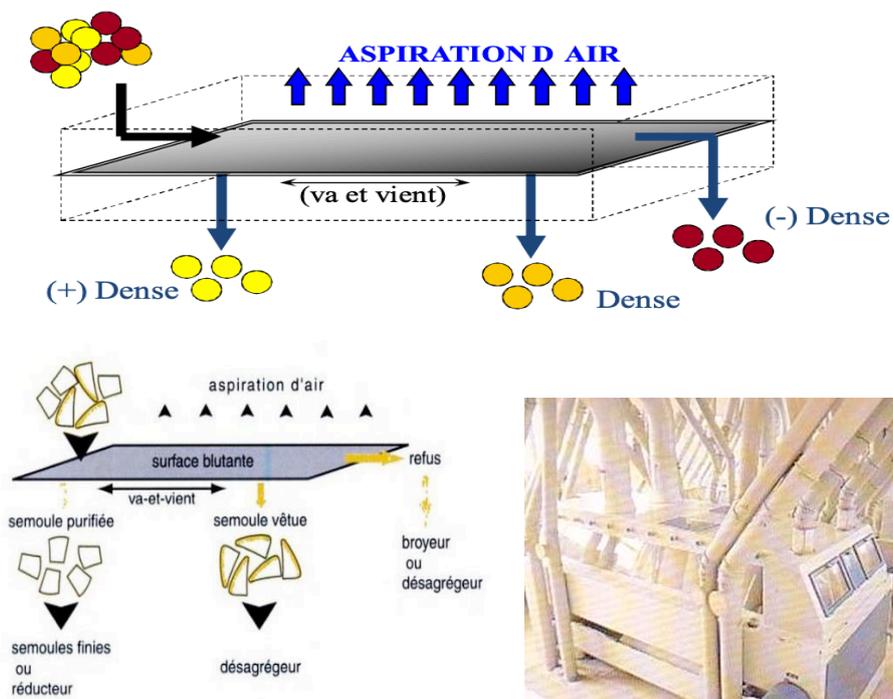


Figure 85 : Principe du sassage et le sasseur

Les particules d'albumen amyliacés sont plus denses ($d=1,4$) que celles d'enveloppe ($d=1,2$) retombent plus rapidement sur les tamis et sont extraites en premier (Fig.86).

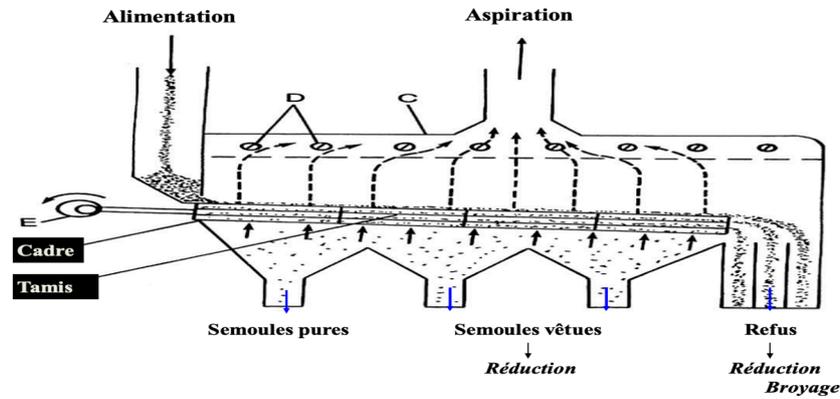


Figure 86 : Les produits du sasseur

III.5.2.5. Curage du son

C'est une opération qui consiste à réduire au maximum la quantité de l'amande adhérant à la face interne des enveloppes (grâce à des brosses à son).

III.5.2.6. Conditionnement et commercialisation

La farine est stockée en cellule de stockage (Fig. 87). La farine est alors prête à être vendue soit:

- En vrac ;
- En sac de 50 ou 25 kg ;
- En sac de 1kg pour l'utilisation

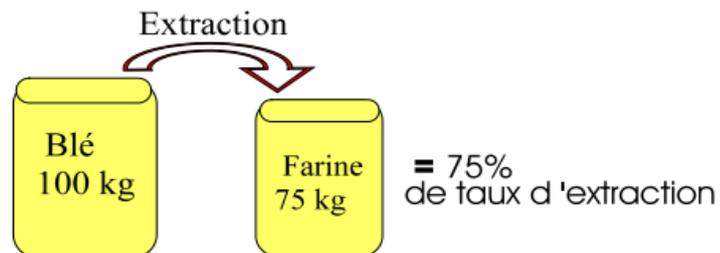


Figure 87 : Conditionnement de la farine

- La composition chimique et les différents types de la farine ainsi que les entreprises productrices dans la filière céréales en Algérie, sont élucidées dans la figure 88, le tableau 29 et la figure 89 respectivement.

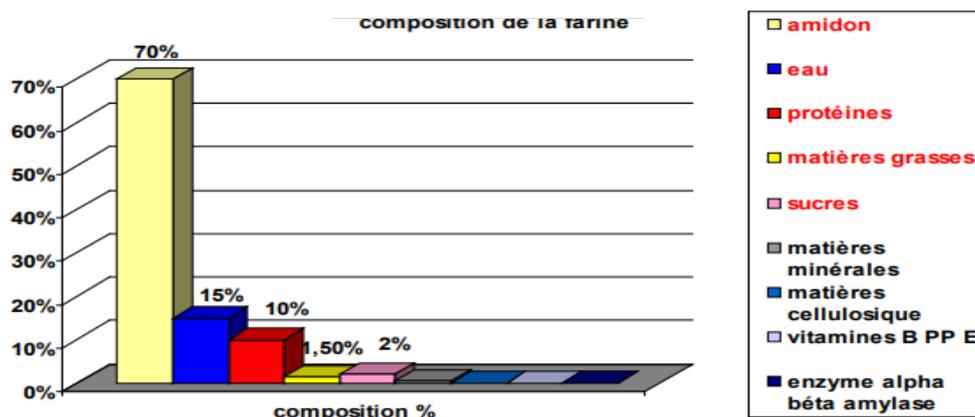


Figure 88 : Composition chimique de la farine

C'est en mesurant la quantité de minéraux contenus dans 100 g de matières sèches que l'on désigne, depuis 1963, les grands types de farine. On parle de "taux de cendres" puisque ces minéraux sont obtenus par incinération de la farine. Ce taux, réglementé par les pouvoirs publics, permet le classement des farines : de la farine de type 45 à 150 (Tab.29)

Tableau 29 : Les différents types de farines

Type	Taux de cendre	Dénomination usuelle	Utilisation
T45	moins de 0,5 %	farine blanche	pâtisserie
T55	de 0,5 à 0,6 %	farine blanche	pain blanc
T65	de 0,62 à 0,75 %	farine blanche	pain de campagne, autres pains dits « tradition »
T80	de 0,75 à 0,9 %	farine semi-complète	pain semi-complet
T110	de 1 à 1,2 %	farine complète	pain complet
T150	plus de 1,4 %	farine intégrale	pain complet « intégral »

Le taux d'extraction est la quantité de farine produite à partir de 100 kg de blé : il est corrélé au taux de cendres de la farine résultante. Concrètement, plus une farine est de couleur blanche et plus ses taux d'extraction et de cendres sont faibles. Ceci s'explique par le fait qu'elle est extraite essentiellement de l'amande du grain de blé, qui contient peu de matières minérales.



Figure 89: Les entreprises productrices dans la filière céréales en Algérie

III.6. Panification :

III.6.1. Définition

La panification est l'ensemble des opérations consistant à transformer la farine en pain, qui passe par deux phases :

- PHASE ACTIVE : Période pendant laquelle la pâte est travaillée
- PHASE PASSIVE : Période pendant laquelle la pâte est en repos.

Le pain est le produit résultant de la cuisson de la pâte obtenue par pétrissage d'un mélange de farine de blé destinée à la panification, eau potable, de sel de cuisson et d'un agent de fermentation. Le mélange peut comprendre éventuellement certains adjuvants ou additifs autorisés.

III.6.2. Principe de la panification

Pour la préparation habituelle de la pâte boulangère, un mélange convenable de farine est additionné d'eau et de sel puis pétri pendant 10 à 20 minutes. La pâte est ensuite additionnée de levure. Une fermentation de 2 à 3 heures produit un dégagement de CO₂ et la pâte gonfle par formation de poches de gaz retenus entre les membranes minces du gluten. La pâte est ensuite coupée, mise en forme et incisée, laissée gonfler à nouveau pendant une heure environ et cuite 20 à 40 minutes dans un four à 235 à 260°C. La cuisson coagule certaines protéines et fixe ainsi la structure spongieuse de la mie. La préparation du pain dure 4 à 8 heures.

III.6.3. Matières premières en panification :

- Farine

Elle est l'élément de base. D'abord parce que mélanger de la farine avec de l'eau permet de former une pâte. Ensuite, parce que les qualités de la farine, ses caractéristiques et ses propriétés ont une influence directe sur le pain. Elle lui donne son goût, sa couleur et sa consistance. Elle détermine la nature de la mie et de la croûte. Le boulanger utilise la farine du meunier, pure ou en faisant ses propres mélanges pour chaque type de pain. Il peut parfois aussi utiliser des mélanges tout prêts soigneusement élaborés par le meunier, appelés "mixes", et destinés à fabriquer un pain spécifique (pain aux céréales...).

- Amidon

Glucide complexe (65-72%) qui va subir une transformation et être métabolisé par les agents de fermentation

- Gluten :

Protéines (8-12%) qui vont former un réseau élastique et extensible qui permet la levée de la pâte et l'aération de la mie

- **Sucres simples** : Saccharose et glucose (1-2%) vont être assimilés rapidement par les levures et permettre d'amorcer la fermentation

III.6.4. Agents de fermentation :

Le pain est fabriqué par deux agents de fermentation notamment la levure et le levain (Fig. 90)

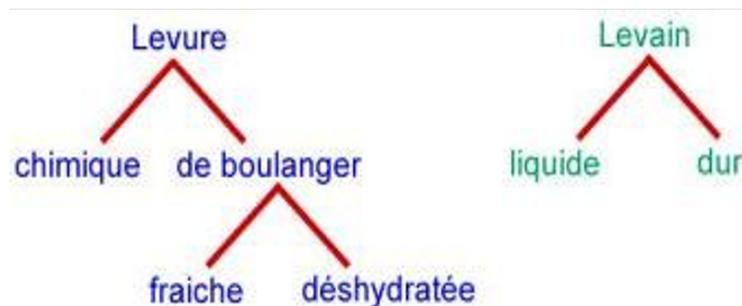


Figure 90: Types de levures et de levains

- Levains :

C'est un mélange de farine et d'eau qu'on laisse fermenter dans un endroit tiède (environ 20°C), ou par prélèvement d'une petite quantité de pâte sur l'une des fournées du jour. (au repos plus de 12 heures en ajoutant régulièrement de la farine et de l'eau). De minuscules micro-organismes capables de faire gonfler la pâte se forment alors peu à peu. Ils constituent la flore de levain constituée précisément d'un mélange de bactéries acidifiantes (lactiques et

acétiques) et de levures sauvages (*Saccharomyces minor*). La fermentation au levain fait donc appel à une fermentation naturelle

- Levure :

C'est un champignon microscopique d'origine naturelle, *Saccharomyces cerevisiae*, utilisé dans la fabrication du pain. Actuellement, on le trouve sous deux formes : levure chimique et de levure de boulanger. C'est un agent de fermentation plus facile à utiliser que le levain car il est produit industriellement et assure un résultat plus rapide et plus uniforme. Elle peut vivre avec ou sans air et sa nourriture préférée est un sucre simple, le glucose. Cet agent biologique permet à la pâte de lever en transformant les sucres en gaz carboniques et en alcools qui s'évaporent à la cuisson.

III.6.4. Sel

Le chlorure de sodium NaCl joue un rôle très important dans la "chimie du pain" :

- Il améliore les qualités plastiques de la pâte (à laquelle il apporte un supplément de fermeté et de ténacité),
- Il contribue à la fixation de l'eau (il retient l'eau),
- Il freine légèrement la fermentation (il régularise la production de gaz carbonique),
- Il participe à la conservation du pain (en fixant l'humidité de la mie).

III.6.5. Eau

L'eau hydrate la farine et fait gonfler toutes les particules d'amidon qui la composent :

- ✓ Dissoudre les ingrédients (farine, levure, sel),
- ✓ Hydrater la farine (ce qui permet de former une pâte),
- ✓ Elle est indispensable au développement des levures,

En humidifiant les particules d'amidon et de gluten, l'eau permet la formation d'un tissu glutineux élastique qui relie entre eux tous les autres composants de la farine. Sans elle, la pâte ne pourrait pas retenir le gaz carbonique au cours de la fermentation. L'eau joue donc un rôle majeur dans la qualité plastique de la pâte. Elle permet en outre de dissoudre le sel.

III.6.6. Améliorants :

Les propriétés de la farine peuvent souvent être modifiées et parfois améliorées soit au niveau de la couleur ou du pouvoir diastasique ou des propriétés plastiques des pâtes à l'aide de traitement ou par addition de produits de nature biologique ou chimique.

III.7. Farine de fève

Elle est mélangée à la farine panifiable à raison de 2% maximum. Elle améliore la production gazeuse et parfois la coloration de la croûte par une très légère activation de l'amylolyse et un très léger apport de sucres fermentescibles.

III.8. Produits maltés

Peuvent être incorporés à la farine jusqu'à 0.3%. Leur rôle est destiné à corriger les farines hypodiastatiques et à rétablir un équilibre enzymatique approprié à la fermentation panariaire. Le principal actif du malt c'est l'amylase α et β , diastases hydrolysant qui possèdent la propriété de transformer l'amidon en sucres (maltose et dextrine). Ce double apport a pour effet d'amplifier l'activité fermentative des pâtes et d'augmenter la quantité de sucres résiduels indispensables à la coloration de la croûte lors de la cuisson.

III.8.1. Poudre du gluten

Elle peut avoir pour but :

- Améliorer la force de la farine et de contribuer à équilibrer ses propriétés plastiques (dans ce cas elle est utilisée à raison de 1.5 à 1.5%) ;
- Renforcer les propriétés physiques des pâtes dans la fabrication des pains spéciaux (1 à 2.5%).

III.8.2. Acide ascorbique

La dose maximale utilisée est de 30 g/quintal de farine. L'acide ascorbique qui est naturellement un antioxydant devient, quand il est incorporé dans la pâte, un agent oxydant actif.

- Il renforce les propriétés physiques des pâtes, il augmente leur tenacité et diminue leur viscosité, il améliore leur tenue ;
- L'oxydation ainsi obtenue ne provoque qu'un très léger blanchiment de la mie et n'a aucune incidence sur le goût du pain. Cette oxydation par contre accélère la maturation de la pâte ;
- Il peut également, lors de la fermentation de longue durée, favoriser la tenue des pâtons et leur rétention gazeuse en assurant la protection des propriétés physiques des pâtes contre l'activité des ferments protéolytiques ;

- Il influence également la coloration de la croûte qu'il contribue à freiner (sert pour corriger les farines hyperdiastasiques).

III.8.3. Lécithine

Peut être utilisée à dose de 100 à 300 g/quintal de farine. C'est un agent émulsifiant dont l'action tend à lubrifier la pâte et à améliorer son extensibilité. Elle joue aussi un rôle d'antioxydant qui se traduit par un très léger freinage du blanchiment de la pâte et de l'altération du goût du pain.

III.8.4. Sucres

- Le saccharose entre dans la composition des produits viennois dont il facilite la fermentation et accroît la finesse.
- Le glucose peut être utilisé dans les pâtes à fermentation rapide (les biscottes).

III.9. Technologie de panification :

La panification est l'ensemble des transformations physiques, de réactions chimiques et d'activités biologiques complexes se produisant au sein d'un mélange de farine, d'eau, de sel, de levure et parfois de quelques autres ingrédients (acide ascorbique, farine de fève, enzyme exogènes, émulsifiants...) sous l'action d'un apport contrôlé d'énergie mécanique et thermique. Pour obtenir du pain, il faut au départ trois composants dont l'action est complémentaire et indissociable qui sont l'amidon qui fournit les sucres, le gluten qui forme le fin réseau élastique et assure la cohésion de l'ensemble et en fin la levure qui produit, comme son nom l'indique, la levée et l'allègement de la pâte.

III.10. Etapes de panification

III.10.1. Pétrissage

Il assure le mélange intime des matières premières mise en œuvre et la confection de la pâte (**Fig. 91**).



Figure 91 : Pétrissage

a- Frassage : c'est l'opération qui consiste à mélanger les ingrédients à vitesse lente pendant 3 à 5 minutes jusqu'à disparition complète de toute trace d'eau et de farine et d'aboutir à la formation d'une pâte grossièrement homogène.

b- Pétrissage : cette deuxième phase se déroule à vitesse rapide et permet de :

- Mélanger de façon intime les ingrédients
- Incorporer de l'air dans la pâte pour permettre la multiplication des levures et le blanchiment de la pâte.
- Hydrater le gluten et former des fibres pour emprisonner l'oxygène et les grains d'amidon.
- Hydrater l'amidon pour le transformer en sucre grâce à l'enzyme amylase

C- Etapes de la fermentation : on distingue 2 étapes :

C-1- Le pointage : c'est la période de la fermentation comprise entre la fin de pétrissage et le pesage de la pâte.

C2- L'apprêt : c'est la fermentation qui s'échelonne de la tourne à la mise en four.

Pour ce faire deux opérations sont effectuées :

- 1- **Le coupage** qui permet aux particules de gluten de se souder afin que la pâte devienne lisse et s'allonge pour retenir les gaz de la fermentation sans se rompre
- 2- **Le soufflage et l'étirage** qui permet d'incorporer l'oxygène dans la pâte pour que les ferments se multiplient.

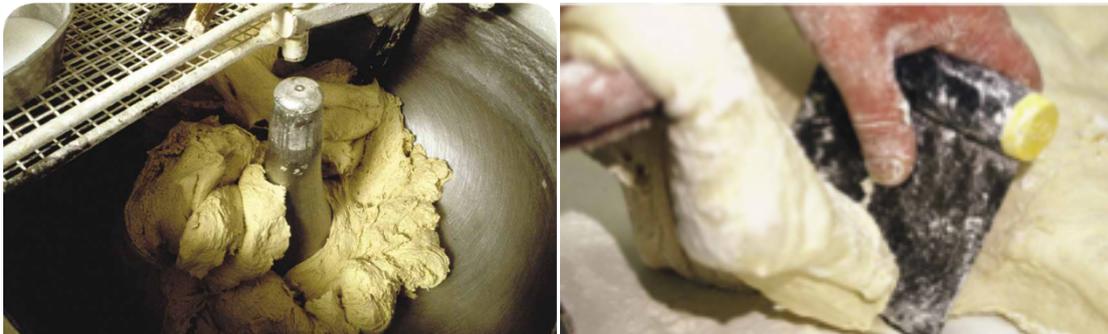


Figure 92 : Pointage et découpage

- Le pétrissage permet de réorganiser les protéines en un réseau viscoélastique, qui va contrôler l'expansion de la pâte pendant la fermentation. En fait, plus on pétrit, et plus on ensemence en levure, plus on aère le pain, ce qui conduit à un volume important.

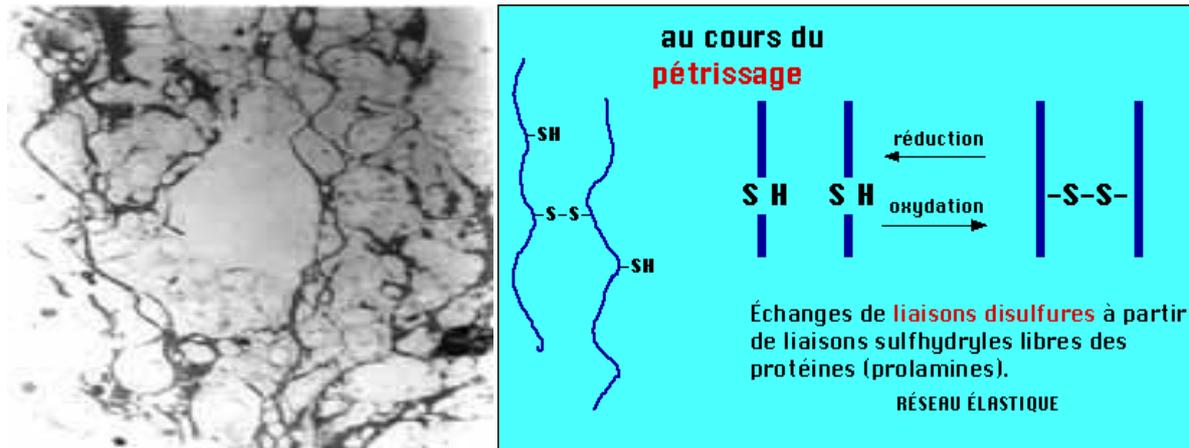


Figure 93 : Réseau (Coupe en microscopie optique d'une pâte à pain crue) et formation du gluten.

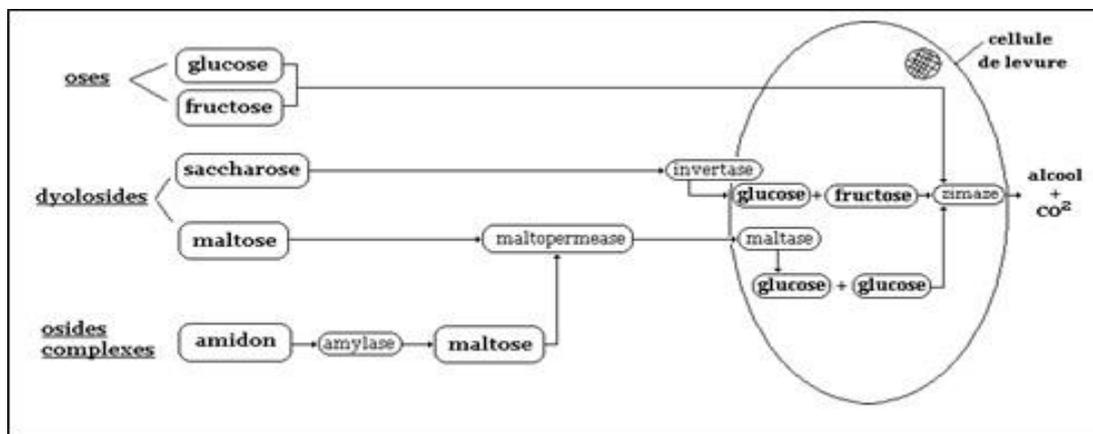


Figure 94 : Structure de la pâte à pain et du pain : respectivement pâte à pain, amidon et réseau de gluten et "trous de fermentation" résultant des bulles de CO₂ dans la mie.

III.10.2. Fermentation (pousse ou pointage) :

La fermentation de type alcoolique, est provoquée par l'action de la levure qui transforme les sucres présents dans la pâte en alcool (éthanol) et en gaz carbonique (CO₂) et est accompagnée d'un dégagement d'énergie. Sur cette action, la pâte va augmenter de volume. La fermentation s'effectue dans une enceinte contrôlée entre 28 et 30 °C pendant 1H30 avec une humidité relative entre 80 et 90%.

Première fermentation « pointage » : Dans un milieu qui n'est pas strictement anaérobie : la levure fermente les glucides libres de la farine (environ 1%) pendant ce temps, la β- amylase attaque les granules d'amidon endommagés au cours de la mouture. On laisse reposer la pâte dans le pétrin à 20-25°C pour permettre l'activité de la levure ou de levain qui réalisent leurs fermentations respectives en utilisant les oses résiduels de la farine. Durant le pointage, l'essentiel des arômes est formé en particulier de l'acide propionique et aussi par d'autres

acides, ces acides non seulement exhausteurs d'arômes mais qui freinent aussi le rancissement.

III.10.3. Pesée et façonnage

Division de la pâte en pâtons : La pâte est découpée en pâtons de poids identiques et cette phase se réalise grâce à une peseuse- diviseuse. Elle doit être faite pour assurer un poids de pain constant et garanti à la vente. Après cette première fermentation, on donnera au pain l'aspect souhaité. On divise et pèse la pâte si nécessaire pour faire les « pâtons ».

III.10.4. Cuisson

Il y a une dilatation des alvéoles gazeuses ce qui permet au pain d'obtenir un volume suffisant et grâce à la gélatinisation de l'amidon et la coagulation du gluten, le pâton se fixe dans sa structure finale. La mie et la croûte vont se former progressivement au cours de la cuisson qui se fait dans un four dont l'atmosphère est saturée en vapeur d'eau. La cuisson se fait vers 250°C durant 20 à 30 minutes. Il reproduit les transformations suivantes : accroissement brusque du volume de pain par la production accélérée de CO₂ et la saturation en gaz de la pâte ; en même temps, il se forme en surface un film précurseur de la croûte. Ces deux changements s'arrêtent lorsque la température interne s'élève vers 60°C, alors l'alcool produit s'évapore.

III.10.5. Ressuage :

C'est la période durant laquelle le pain se refroidit. Ce refroidissement est accompagné d'un départ de vapeur d'eau et de CO₂ entraînant une légère perte d'humidité au niveau de la mie et pour le pain une perte de poids. Le pain chaud est refroidi lentement, de manière à ce que sa fraîcheur dure de 12 à 18 heures. C'est donc un produit fragile ; il rassit même en atmosphère humide (ce n'est pas une simple dessiccation). Divers additifs ont été préconisés pour freiner le rassissement ; en particulier, les agents tensioactifs, comme les monoacylglycérols, qui formeraient un complexe avec l'amylose et empêcheraient sa diffusion.

Références bibliographiques

1. Abecassis, J. (2015). La filière blé dur. INRA-UMR IATE, Trafoon, 24.
2. Albagnac, G., Varoquaux, P., & Montigaud, J. C. (2002). Technologies de transformation des fruits. Editions TecDoc/Lavoisier. 498 p
3. Arzate, A. (2005). Extraction et raffinage du sucre de canne. Revue de l'ACER (Centre de recherche, de développement et de transfert technologique en acériculture). pp 6.
4. Benzohra, b. (2018). La filière sucre en Algérie dans le contexte de la mondialisation. Journal of Economic Sciences Institute 21(01) : 09-19
5. Bessaoud, O., Pellissier, J. P., Rolland, J. P., & Khechimi, W. (2019). Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie (Doctoral dissertation, CIHEAM-IAMM).
6. Bordeaux, D., Bénézet, J. C., & Benhassaine, A. (2007). Les mécanismes de la rupture au cours du broyage de grains de blé dur.
7. Bureau International du Travail Genève. (1990). Conservation des légumes à petite échelle ; Série Technologique, Dossier Technique n13. 1ere édition. 167 p.
8. Burzawa, E., & Heitz, F. (1995). La cristallisation du sucre: des bases théoriques à la production industrielle. Industries alimentaires et agricoles, 112(7), 522-532.
9. Chabane, M., & Boussard, J. M. (2012). La production céréalière en Algérie: Des réalités d'aujourd'hui aux perspectives stratégiques de demain.
10. Cheftel, J. C., & Cheftel, H. (1992). Introduction à la Biochimie et à la Technologie Des Aliments. Technique et Documentatia. Paris Cedex, 1, 243 p.
11. Chou, C. C. (Ed.). (2000). Handbook of sugar refining: a manual for the design and operation of sugar refining facilities (Vol. 467). John Wiley & Sons.
12. Code de la consommation : Article R.412-18, Alinéa 9 du règlement (UE) n°1169/2011 et du conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires
13. Cruz, J. F., Hounhouigan Djidjoho, J., Havard, M., & Ferré, T. (2020). La transformation des grains. Éditions Quae. 198 p
14. Cruz, J. F., Hounhouigan, J. D., & Fleurat-Lessard, F. (2016). La conservation des grains après récolte. Editions Quae.
15. Decloux, M. (2003). Procédes De Transformation En Sucrierie Partie 2. Ed. Techniques Ingénieur.
16. Décret n°55-241 du 10 février 1955 relatif aux conserves et semi-conserves
17. Djermoun, A. (2009). La production céréalière en Algérie: les principales caractéristiques. Nature & Technology, (1), 45.
18. Encyclopédie Larousse (1988).
19. FAO, 1995. Le sorgho et les mils dans la nutrition humaine. FAO, Rome, Alimentation et nutrition n° 27, 198 p.
20. FAO, 2015. Vue d'ensemble régionale de l'insécurité alimentaire en Afrique. Des perspectives plus favorables que jamais. Accra, FAO, Rome, 26 p.
21. Feillet, P. (2006). Influence de l'évolution des technologies de production et de transformation des grains et graines sur la qualité des aliments: Rapport de l'Académie des technologies. Industries alimentaires et agricoles, 123(12), 9-29.

22. FICUR ; Tout connaître sur les surgelés ; 51 pages.
23. Fliedel, G., Ouattara, M., Grabulos, J., Drame, D., & Cruz, J. F. (2004). Effet du blanchiment mécanique sur la qualité technologique, culinaire et nutritionnelle du fonio, céréale d'Afrique de l'Ouest.
24. Godon, B. (1981). Le pain pour la science, 50.
25. Godon, B., & Willm, C. (1991). Les industries de première transformation des céréales.
26. Guiheneuf, Y. (1988). Références Productions Fruitières ; Editions Synthèse Agricole. 276 p.
27. Honig, P. (Ed.). (2013). Principles of sugar technology. Elsevier.
28. Hugot E. (1987). La sucrerie de canne. In : « carbonatation ». Lavoisier. Tec & Doc, 3ème édition, 738p.
29. Huyghe, C., Desprez, B., Laudinat, V., & Guillaume, D. (2020). La betterave sucrière: L'innovation compétitive (p. 152). éditions Quae.
30. James, I. F., & Kuipers, B. (2003). AD03F La conservation des fruits et des légumes. Agromisa Foundation.
31. Leraillez, P., Baillere, J.B et fils (1955). La conservation industrielle des aliments. Paris. 512p.
32. Mafart, P. (1991). Génie industriel alimentaire, tome 1: les procédés physiques de conservation. Lavoisier, Paris, 294 p.
33. Mathlouthi, M. (1995). Le sucre amorphe: structure, obtention et importance dans les produits alimentaires. Industries alimentaires et agricoles, 112(7-8), 499-505.
34. Matouk, S. (2019). Les procédés de conservations des céréales (le blé) et les moyens de stockages au niveau de la coopérative des céréales et des légumes secs (CCLS) de Tizi-Ouzou (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
35. Nombrot, M. (2019). 1812-1914: un siècle d'histoire et d'utilisation du sucre de betterave.
36. Perrier-Robert, A., & Bernardin, M. P. (1999). Le grand livre du sucre. Solar.
37. Roux, J. L. (1994). Conserver les aliments : comparaison des méthodes et des technologies. Technique et Documentation Lavoisier. 705p
38. Surget, A., & Barron, C. (2005). Histologie du grain de blé. Industries des céréales, (145), 3-7.
39. Tirilly, Y., & Bourgeois, C. M. (1999). Technologie des légumes. Editions Tec & Doc. 558 p.
40. Van der Poel, P. W. (1998). Sugar technology. Beet and cane sugar manufacture/PW van der Poel, H. Schiweck, T. Schwartz. Berlin: Verlag Dr. Albert Vartens KG.
41. Varoquaux, P., Albagnac, G., & Montigaud, J. C. (1999). Production and processing of fruit and vegetable: priorities for public research.