



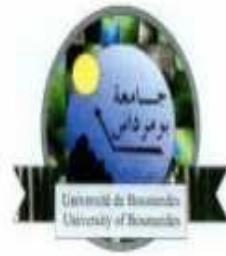
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة احمد بوقرة بومرداس

Université M'hamed Bougara de Boumerdès



Support de cours
Biotechnologie Agroalimentaire
Pour
Master1 Biotechnologie Végétale

Préparé par : Dr. BENAMROUCHE née LAGHA Samira

Année universitaire 2018-2019

Contenu de la matière

Chapitre 1 Valorisation de la production alimentaire d'origine végétale (protéines, lipides glucides)

- Plantes à protéines (Exemple: protéines foliaires)
- Plantes arômatiques
- Plantes à boissons
- Plantes oléagineuses
- Plantes à glucides

Chapitre 2 Utilité des biomolécules dans la maîtrise et l'amélioration des propriétés techno fonctionnelles

- Maîtrise des qualités organoleptiques des aliments
- Amélioration de propriétés techno fonctionnelles

Chapitre 3 Principales application des biomolécules d'origine végétale en industries alimentaires

- Usage dans la fabrication des produits céréaliers
- Usage dans la préparation des fruits et légumes
- Usage dans la transformation des matières grasses
- Usage dans les produits laitiers
- Usage dans les produits carnés

Chapitre I : Valorisation de la production alimentaire d'origine végétale

I.1. Les substances foliaires (protéines foliaires)

Contrairement aux protéines de soja, de blé ou de pois, extraites des graines, les protéines foliaires sont extraites des organes aériens de la plante et principalement des feuilles. De plus, généralement ces végétaux sont pérennes ; ce qui représente une réelle économie par rapport aux plantes annuelles à semer chaque année sur terrains adaptés.

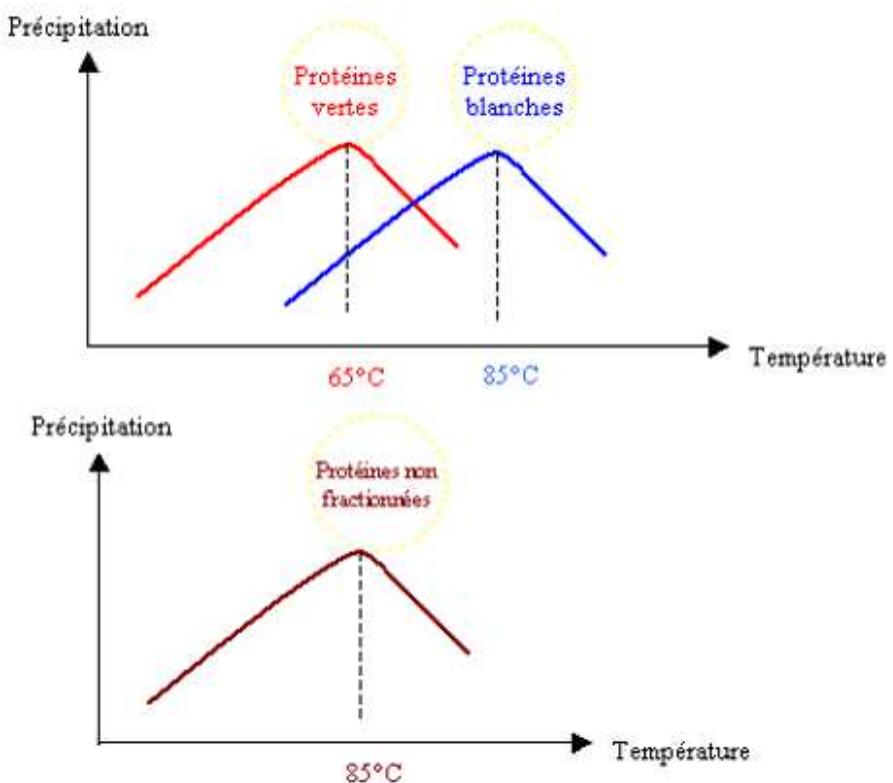
Les protéines foliaires sont principalement des enzymes localisées en majeure partie dans les chloroplastes. Les protéines chloroplastique sont constituées de :

- Protéines membranaires insolubles dans l'eau, elles contiennent la LHCP (Light-Harvesting Chlorophyll a/b Protein), elles sont chargées en lipides et en pigments chlorophylliens et caroténoïdes, elles constituent la protéine "verte".
- Protéines hydrosolubles, généralement dépourvues de pigments lipophiles, elles renferment la RuBP carboxylase (Ribulose - 1,5-Bisphosphate carboxylase) ainsi que l'ensemble des protéines cytoplasmiques elles constituent la protéine "blanche". Ces protéines sont celles qui potentiellement sont les plus intéressantes car à l'état pur elles sont inodores, insipides et incolores.

Dans l'extrait protéique foliaire il y a deux protéines majeures qui forment ensemble près de la moitié des protéines totales :

- La RuBP carboxylase: enzyme du stroma responsable de l'assimilation du CO₂, il s'agit d'une protéine de réserve qui représente 40 à 80 % des protéines foliaires totales du soja, de la luzerne et de la plupart des céréales.
- La LHCP: protéine lamellaire.

Ces deux types de protéines représentent deux fractions distinctes pouvant être coagulées ensemble par la chaleur ou obtenues séparément par des opérations de chauffage en deux temps (55 à 65°C pour les protéines chloroplastiques "vertes" et 80°C pour les protéines chloroplastiques "blanches").



Les protéines foliaires ont plusieurs rôles :

1. Rôle structural (paroi végétale);
2. Rôle fonctionnel (les enzymes de régulation de réponses physiologiques et du métabolisme ainsi que les molécules signales et récepteurs) ;
3. Rôle de défenses : en cas d'attaque la cellule végétale répond par la sécrétion de nombreux composés dont les protéines de défense Pr DV :
 1. PR (Prothogenesis-Related) (rôle de défense)
 2. PR-like (Prothogenesis-Related- like) (rôle défensif et physiologique)
 3. Protéines de réponses aux stress abiotiques (sécheresse, froid, salinité,...etc.).
 - a. Réponses aux stresse thermique :HSP (Heat shock proteins) en association avec les cyclophilines limitent les dégâts conformationnels aux protéines.
 - b. Le froid suscite la sécrétion de β -1,3 glucanases, de lipocaline et les protéines PR-10 qui pourraient contribuer à améliorer la résistance des plantes aux stress thermiques.
 - c. Réponses aux stress osmotiques : on retrouve les germines, cystéines protéases et certains thaumatin-like (Tableau 1)

Tableau 1 : Les familles de PR-protéines selon la classification de Van Loon

	Famille de protéines	Mécanisme d'action de défensive	Allergènes décrits	
			Nombre	Exemple
PR-2	Bêta 1,3-glucanase	Attaquent les polysaccharides de la paroi du pathogène	2	Olivier
PR-5	Thaumatin-Like	- Résistance au choc osmotique et au froid - Perméabilité de la membrane	6	Pomme
PR-9	Peroxydases	- Détoxification de H_2O_2 - Synthèse de lignine	1	Farine de blé

La teneur en protéines foliaires des végétaux est très variable (voir le tableau 2).

Tableau 2 : La teneur en protéines foliaires de certains végétaux

Type de végétal	Protéine brute en % de la matière sèche foliaire
Ortie	40
Ricin	36.9 – 41.3
Patate douce	26.7
Epinards	20 -25
Chou	21.2
Bananier	19.3 -20.9
Luzerne	15 -20
Plantes aquatiques	5

I.1. 1. Extraction et obtention de concentrât de protéines foliaires

L'extraction des protéines débutent par la réduction en pulpe des feuilles par broyage. Ce broyage est suivi d'un pressurage qui permet de séparer de la masse fibreuse le jus vert contenant une grande partie des protéines insolubles et des protéines solubles dans l'eau. La séparation des protéines insolubles de ce jus se fait par la chaleur (en deux temps (55 à 65°C pour les protéines chloroplastiques "vertes" et 80°C pour les protéines chloroplastiques "blanches")). Après cette étape, une centrifugation permet de séparer le concentré protéique du sérum (voir Fig. 1).

En raison de leur grande richesse en protéines (90 % sur matière sèche) les isolats protéiques "blancs" sont très utilisés pour la nourriture du bétail mais aussi en alimentation humaine dans les régions où les protéines animales font défaut. Quant aux concentrats protéiques "verts" comportant le carotène (provitamine A) à un taux d'environ 800 ppm, ils peuvent être utilisés en tant que supplément protéique vitaminé.

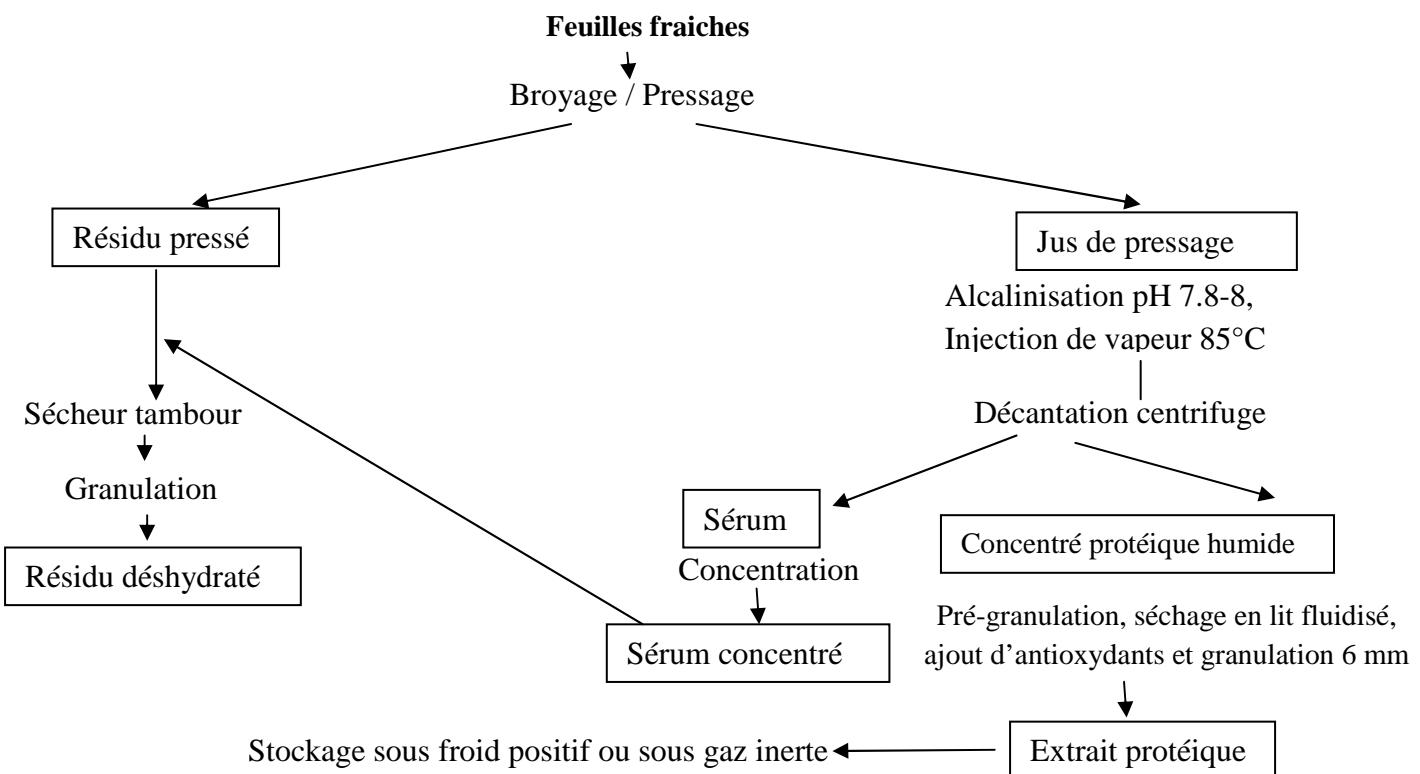


Fig. 1 : Schéma général d'extraction industrielle des protéines foliaires

I.1.2. Utilisation des extraits foliaires en alimentation

I.1.2.1. Nutrition

Les protéines foliaires ne sont pas seulement moins coûteuses à produire mais elles sont reconnues aujourd'hui comme protéines complètes équilibrées en acides aminés. Leur valeur nutritionnelle est équivalente à celles des œufs, du lait ou des viandes (Tableau 3, 4). Accompagnées en plus de vitamines, minéraux et phyto-nutriments, elles sont qualifiées de véritables sources nutritionnelles.

Exp 1 : 10 g des feuilles de luzerne apportent :

* En protéines autant qu'un œuf de 50g

* En calcium autant que 30 g de fromage blanc

* En fer autant que 200 g d'épinards

Exp 2 : Les feuilles d'ortie contiennent en forte quantité 18 acides aminés différents dont les 8 acides aminés essentiels (isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane et valine) en proportions harmonieuse (Tableau 5), ce qui en fait un aliment protéique complet. A titre de comparaison, les céréales sont toutes déficientes en lysine (certaines également en tryptophane), tandis que les légumineuses sont déficientes en méthionine. Les feuilles d'ortie sont particulièrement riches en calcium, en fer, en bore, en pro-vitamine A, en vitamine E ainsi qu'en vitamine C (Tableau 6). Dans 100g de feuilles d'ortie fraîche, on a la totalité des Apports Journaliers Recommandés (AJR) de calcium et de fer, ainsi que 6 fois les AJR de provitamine A et 4 fois ceux de vitamine C

Tableau (3) : Comparaison d'aminogramme de l'extrait protéique de luzerne à celui d'autres matières premières en référence aux standard FAO

AA (%) MS	Extrait protéique de luzerne	Tourteau soja	Gluten maïs	Standard FAO
Lysine	5.9	6.1	1.8	5.8
Méthionine +cystine	3.1	2.9	4.2	2.5
Tryptophane	2.4	1.3	0.5	1.1
Thréonine	4.3	3.9	3.4	3.4
Histidine	2.5	2.7	2.1	1.9
Leucine	8.6	7.4	16	7.7
Isoleucine	5.0	4.6	4.1	2.8
Phénylalanine+Tyrosine	9.8	8.4	11.2	6.3
Valine	5.8	4.8	4.6	3.5

Tableau (4) : Comparaison entre l'extrait foliaire des feuilles de luzerne et le lait entier en poudre

AA (%) MS	Extrait protéique de luzerne (%)	Lait en poudre (entier) (%)
Eau	8	3
Protides	55-58	26
Lipides	9-10	26
AGPI	6.4	0.9
Glucides	10-12	38
Minéraux	13-14	8
Fibres	1-2	Non déterminé

Tableau 5 : Teneurs en acides aminés essentiels des feuilles d'Ortie et besoins quotidiens humain

Acides aminés	Pour 100 g de feuilles fraîches d'ortie	Besoins quotidiens humain
Isoleucine	4.87g	0.7 g
Leucine	8.97g	1.1 g
Lysine	5.53g	0.8 g
Méthionine	1.76g	1.1g ou 0.2 g en présence de cystéine
Phénylalanine	5.82 g	1.1g ou 0.2 g en présence de Tyrosine
Thréonine	4.61g	0.5 g
Tryptophane	1.28 g	0.25 g
Valine	6.31 g	0.8 g

Tableau (6) : Composition chimique des feuilles d'ortie

Élément	Teneur
Eau	76,9 à 80 g /100 g
Fibres	2 à 5,3 g / 100 g
Cendres	4 à 5,6 g / 100 g
Protides	4,6 à 8 g / 100 g
Lipides	0,7 à 1,6 g / 100 g
Glucides	7,1 à 12,7 g / 100 g
Calcium	60 mg à 3,24 g / 100 g
Phosphore	10 à 673 mg / 100 g
Fer	7,8 à 13,4 mg / 100 g
Sodium	1 à 16 mg / 100 g
Potassium	400 mg à 2,044 g / 100 g
Magnésium	7 à 399 mg / 100 g
Manganèse	3 à 3,31 mg / 100 g
Zinc	0,9 à 1,87 mg / 100 g
Cuivre	0,52 à 1,59 mg / 100 g
Bore	3,05 mg / 100 g
Sélénium	2,7 µg / 100 g
Pro-Vitamine A ou Caroténoïdes	0 à 6 mg / 100 g
Vitamine B1 ou Thiamine	15 µg à 0,15 mg / 100 g
Vitamine B2 ou Riboflavine	0,12 à 0,23 mg / 100 g
Vitamine B3 ou vit. PP ou Niacine	0,1 à 1,45 mg / 100g
Vitamine B6 ou Pyridoxine	68 µg / 100 g
Vitamine B9 ou Acide folique	212 mg / 100 g
Vitamine C	18,8 à 350 mg / 100 g
Vitamine E ou α -Tocophérol	14,4 mg / 100 g

Il arrive que des facteurs antinutritionnels limitent l'emploi de certaines feuilles. Les épinards sont riches en oxalate et en nitrates (en présence d'engrais) ce qui diminue l'absorption des minéraux (essentiellement le calcium).

Les protéines foliaires sont plus économiques que les protéines animales :

- 5 Kg de protéines végétales directement consommables par l'homme sont nécessaires pour produire 1Kg de protéines de lait.
- 7 Kg de protéines végétales sont nécessaires pour produire 1Kg de protéines de porc.
- 17 kg de protéines végétales sont nécessaires pour produire 1Kg de protéines de bœuf.
- 5 Kg de protéines végétales sont nécessaires pour produire 1Kg de protéines d'oeuf.

Les extraits foliaires sont utilisés en alimentation animale pour les intérêts qu'ils présentent : l'apport en B carotène (source de vitamine A), l'enrichissement en vitamine E des produits et l'amélioration du statut antioxydant de l'animal. Contrairement aux extraits animaux, les extraits foliaires n'apportent pas de graisses saturées néfastes pour la santé et apportent des fibres qui facilitent le transit digestif.

I.1.2.2. Agroalimentaire : Les extraits foliaires possèdent des propriétés fonctionnelles identiques à celles du lait ou des œufs. Elles sont utilisées comme additif.

Exp 1 : Colorant (lutéine de couleur jaune extraite du maïs et de luzerne, Zéaxanthine de couleur jaune orangé extraite du maïs, capsanthine de couleur rouge extraite de paprika).

Exp 2 : Antioxydant (B carotène, vitamine E, ...etc.).

Exp 3 : Emulsifiant, moussant, gélifiant (globulines 11S et 7S), propriétés adhésives (gluten).

Exp4 : les prolamines du blé en présence d'eau présentent une viscoélasticité qui est exploitée en industrie céréalière pour la fabrication des pâtes.

I.2. Plantes aromatiques

I.2.1. Définition

Les plantes aromatiques sont un ensemble de plantes utilisées en cuisine et en phytothérapie pour les arômes qu'elles dégagent, et leurs **huiles essentielles** que l'on peut extraire. Ces plantes aromatiques sont cultivées selon les besoins pour leurs feuilles, tiges, bulbes, racines, graines, fleurs, écorces,... etc. Les plantes aromatiques comprennent les plantes utilisées comme épices, aromates ou condiments, parfois combinées en mélanges aromatiques. Les plantes aromatiques peuvent se répartir entre les [épices](#), plantes dont on utilise les parties dépourvues de [chlorophylle](#), et les [herbes](#), celles dont on utilise les parties vertes. La distinction entre ces trois groupes est confuse : **Épices, condiments et aromates : quelle différence ?**

- **Un aromate :** est une substance parfumée, odoriférante, utilisée en médecine, en parfumerie, en cuisine. un aromate comme son nom l'indique, concerne le nez, il a un arôme, un parfum et est utilisé pour donner ou modifier la senteur d'un met mais sans en changer son goût. il est souvent consommé frais, parfois séché ou en graines. Parmi les aromates on trouve : le basilic, le persil, la coriandre, le thym, le fenouil...etc.
- **Une épice :** est une substance végétale à la saveur forte, prononcée et souvent piquante, qui sent bon l'exotisme. Elle intervient dans la préparation du plat, auquel elle confie une saveur spécifique et reconnaissable. Les épices, elles sont du domaine gustatif. Plus relevées que les aromates, elles donnent de la saveur à un plat, rehaussent le goût d'un aliment... Les épices sont souvent obtenues après séchage de la plante et/ou transformation (fermentation, blanchiment, stabilisation...). Parmi les épices on trouve : le safran, la cannelle, le gingembre, le curry, le paprika... Certains ingrédients sont à la fois des aromates et des épices comme l'ail par exemple, qui possède un arôme et du goût.
- **Condiment :** est relatif à l'assaisonnement. A l'inverse du de l'épice qui intervient dans la préparation du plat, auquel il confie une saveur spécifique et reconnaissable et ne se mange pas seul, le condiment quant à lui est une préparation plus ou moins élaborée, servi à part du mets et il se mange tel qu'il est. Ainsi, la graine de moutarde est une épice, alors que la moutarde de table fait partie de la famille des condiments, au même titre que le piccalilli ou les pickles par exemple.

Les herbes aromatiques sont des plantes cultivées dans les jardins potagers ou en grandes cultures maraîchères pour leurs qualités aromatiques, condimentaires ou médicinales.

I.2.2. Huiles essentielles

I.2.1.1. Définition

Les HE_s sont des substances odorantes et volatiles, extraites d'un végétal (fleurs, bourgeons, graines, feuilles, brindilles, écorces, fruits, herbes et bois) sous forme liquide par différents procédés : distillation, par solvants, à froid, hydrodiffusion et par des techniques innovantes telles que les ultrasons, l'extraction assistée aux micro-ondes et au moyen des solvants supercritiques. Elles sont plus ou moins colorées et leur densité est en général inférieure à celle de l'eau.

I.2.1.2. Place des HEs dans les métabolites végétaux

Les HEs sont des métabolites secondaires des végétaux ils font parties de la classe des terpènoïde. Ce sont des molécules qui dérivent de l'isoprène (C_5H_8). Ils se différencient par le nombre n d'unités isopréniques qui les constituent (C_5H_8) n.

Les métabolites secondaires sont des composés qui ne participent pas directement au développement des plantes mais plutôt interviennent dans la relation avec les stress biotiques et abiotiques.

I.2.1.3. Classification

N	Terpènes	Exemples, rôles biologiques et / ou emploi
2	Mono terpènes	volatiles aromatiques présents dans les huiles essentielles (menthol, loganoside,...) attirent/repoussent les insectes lors de la pollinisation
3	Sesquiterpènes	volatiles aromatiques exp : Farnésol (utilisés en parfumerie), carophylène (responsable du piquant du poivre), thymol (thym), l'acide abscissique (hormone végétale responsable de la chute des feuilles et des fruits)
4	Di terpènes	Phytol (persil) : joue un rôle fondamental dans la constitution de la chlorophylle, de la vitamine E et K1.
5	Sesterpènes	Bolivianine,...etc.
6	Tri terpènes (stéroïdes)	Acide oléanolique (olivier) : revêtement protecteur des cellules végétales, Scalènes (++requin), brassinostéroïdes (rentrent dans la constitution des hormones stéroïdiennes).
8	Tétra terpènes (caroténoïdes)	Lycopènes (tomates) : pigment rouge à pouvoir antioxydant
> 8	Poly terpènes	Gutta-percha (utilisé en prothèse dentaire), caoutchouc, latex,...etc.

I.2.1.4. Rôles et utilisation des terpènes

Les terpénoides possèdent des propriétés physiologiques puissantes et spécifiques : précurseurs des hormones végétales, phéromones d'invertébrés, substances de croissances des végétaux (vitamines, ...), ils interviennent également dans la conservation de l'humidité des plantes dans les climats désertiques et ils interviennent dans la défense de la plante contre les insectes, les micro-organismes et les parasites (propriétés insecticide et antimicrobienne). Les terpénoides constituent l'une des bases des industries de parfums, des arômes et des colorants alimentaires pour leur propriété organoleptique. Ils ont des actions pharmacologiques sur les organismes qui les ingèrent (laxatifs, antimitotiques, substances allergisantes,...etc.) Ils sont utilisés comme antiseptiques, sédatives et en cosmétologie comme odorant pour la fabrication des parfums, crèmes,...etc.

I.2.3. Intérêt et utilisation des HEs

Les HE ont des usages thérapeutiques, dans la médecine humaine, pour leurs propriétés anticancéreuses, antivirales, antiphlogistiques, antioxydantes et antimicrobiennes,...etc. En cosmétologie, elles sont intégrées dans les analgésiques pour la peau, les crèmes antisolaires,...etc. Dans l'industrie agroalimentaire, elles sont utilisées comme aromatisant et comme additifs pour la fabrication des boissons non alcoolisées, les confiseries, les sauces ainsi que pour l'enrichissement du régime alimentaire humain et animal. Une alimentation enrichie en HE réduit le risque de fréquence de l'hyperlipidémie, l'obésité et autres maladies. Les HE sont également utilisées pour la synthèse des principes actifs médicamenteux, de vitamines (K, E et A) et des substances odorantes.

I.2.4. Extraction des huiles essentielles

Il existe plusieurs méthodes :

1. Par pression à froid (surtout pour l'extraction des essences des écorces d'agrumes) ;
2. Extraction par solvant volatile (hexane) (dispositif Soxhlet) (**Fig.1**);
3. Hydro distillation (entrainement à la vapeur) (**Fig.2**)

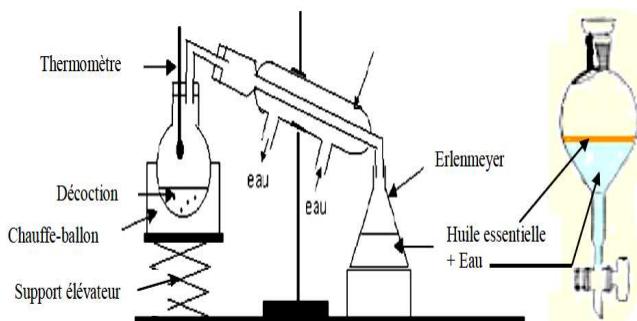


Fig.(1)

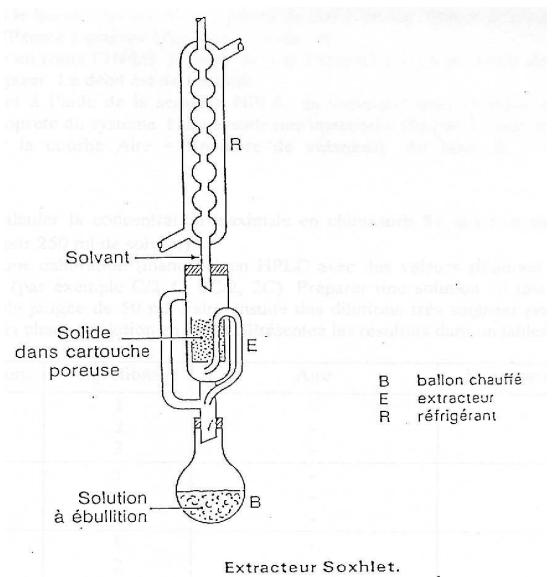


Fig. (2)

L'hydrodistillation est la méthode la plus simple pour extraire les HE_s et de ce fait elle est la plus utilisée. La matière végétale est immergée directement dans un ombilic rempli d'eau et placé sur une source de chaleur. Les vapeurs sont condensées dans un réfrigérant et les HE_s se séparent de l'hydrolysat par simple différence de densité. Les HE_s étant plus légères que l'eau, elles surnagent au-dessus de l'hydrolysat. Cependant, l'hydrodistillation possède des limites. En effet, un chauffage prolongé et trop puissant engendre la dégradation de certaines molécules aromatiques.

Le matériel végétal frais et mixé est introduit dans un ballon de 2 litres, celui-ci est rempli d'eau distillée (jusqu'au 2/3 de son volume). Ce dernier est mis dans un chauffe-ballon. La vapeur d'eau qui se dégage est chargée en HE_s et passe dans le réfrigérant où le débit est d'une goutte par seconde et la température est inférieure à 25°C. Ainsi, les vapeurs se condensent en gouttelettes, qui seront récupérées au bout de 3h dans un erlenmeyer. Le distillat obtenu est un mélange d'HE_s et d'eau. Pour séparer les deux phases une extraction liquide/ liquide est réalisée à l'aide d'un solvant apolaire (éther diéthylique). Après l'agitation, deux phases non miscibles apparaissent (**Fig. 3**).

- une phase aqueuse plus dense, située au dessous, appelée « eau aromatique ».
- une phase organique moins dense située au dessus, contenant la majorité des composés aromatiques. C'est cette phase là qui est récupérée après décantation.

Après plusieurs lavages de la phase aqueuse avec l'éther diéthylique, les phases organiques sont récupérées, mélangées puis séchées sur un papier filtre contenant du sulfate de sodium anhydre. Ce dernier permet de piéger les molécules d'eau qui peuvent être présentes dans cette phase. Après évaporation totale du solvant apolaire, les HE_s sont conservées séparément au réfrigérateur ($4\pm1^{\circ}\text{C}$) dans des flacons opaques et hermétiquement clos pour les préserver de la lumière, de l'air et des variations de température qui sont des principaux agents de dégradation des HE_s.

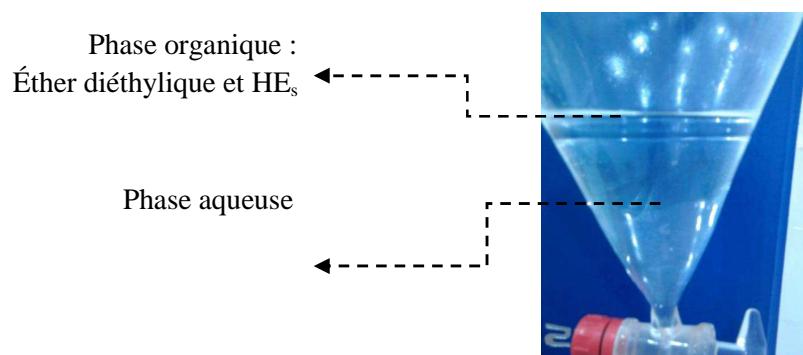


Fig. 3 : Photographie d'une séparation de deux phases après ajout de l'éther diéthylique

I.3. Plantes à boisson

Les boissons obtenues à partir des plantes sont des boissons contenant des extraits de fruits ou de plantes aromatiques. Elles peuvent être non fermentées (jus, tisane et sirop) ou fermentées (bière, vin, ...etc.).

Les sirops traditionnels sont des solutions concentrées de sucre et d'eau, ils sont obtenus à partir de céréales, de plantes, d'arbres et de fruits. Les sirops de céréales sont principalement obtenus à partir de blé, d'orge, de maïs et de riz. Les sirops de plantes sont obtenus à partir de la tige : canne à sucre sirop appelé vesou, sorgho, de tubercule : betterave à sucre, de l'ensemble de la plante : agave. Les sirops d'arbres sont obtenus à partir de la sève du bouleau, de l'érable et des palmiers. Les sirops de fruits sont des jus extraits du fruit et concentrés : raisin, datte, abricot... Les sirops aromatisés sont destinés à la boisson et aux desserts : fraise, menthe, grenade, cassis, orgeat (amandes). Les boissons fermentées sont des boissons obtenues, à partir de sève, de fruits, de grains, etc , par fermentation, transformation des sucres en alcool.

I.3.1. Cas de boissons non fermentées : Thé

Le thé est la boisson la plus buée dans le monde. La feuille fraîche contient différents principes actifs tels que : les terpenoides essentiellement des HEs et les catéchines (composés phénoliques) qui joueraient différents rôles : ralentir le vieillissement, faciliter le drainage ...). La boisson contient également des vitamines : C, B, E et K et des micro-éléments : fluor, nickel et manganèse.

L'extraction des principes actifs étant différée dans le temps par rapport à la récolte des échantillons, la conservation de ces derniers est nécessaire. Les cellules végétales contiennent différents types d'enzymes, susceptibles de provoquer des modifications des composés phénoliques contenus dans le matériel végétal, en particulier des polyphénols oxydases et des glycosidases. Cet inconvénient peut être éliminé par un séchage rapide du matériel végétal aussi tôt après sa collection. Un séchage à des températures inférieures à 50 C° peut ramollir le tissu végétal, affaiblir l'intégrité des parois cellulaires et hydrolyser les liaisons phénols-protéines ou phénols-polysaccharides, améliorant ainsi la solubilité des composés phénoliques. Le matériel végétal séché peut être conservé pendant un certain temps sans modifications importantes.

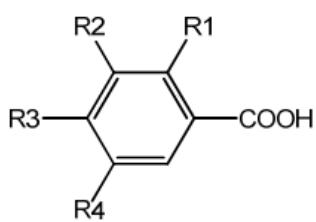
L'extraction solide-liquide met en jeu des mécanismes moins bien connus. En effet, le solvant doit franchir la barrière solide-liquide, dissoudre le principe actif à l'intérieur du solide et le soluté doit ressortir du solide. L'entrée du solvant se fait par mécanisme osmotique et la sortie du soluté par diffusion.

Les composés phénoliques (polyphénols) : Ce sont métabolites secondaires des végétaux. Ce sont des dérivés non azotés dont l'élément structural de base est un noyau benzénique auxquels sont directement liés un ou plusieurs groupes hydroxyles, libres ou engagés dans une autre fonction chimique (éther, ester,...etc.).

I.3.1.1. Classification : Selon leurs structures Ils sont divisés en deux classes (simples et complexes)

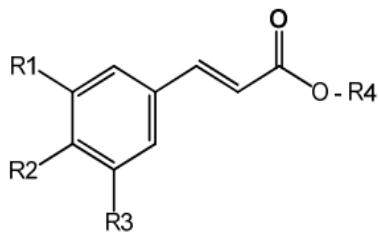
a. Polyphénols simples :

a.1. Les acides phénoliques et coumarines : Le terme acide phénoliques s'applique à tous les composés possédant au moins une fonction carboxylique et un hydroxyle phénolique (acides benzoïques : C₆-C₁, acides cinnamiques : C₆-C₃) (Fig.1).



R₁ = R₂ = R₃ = R₄ = H : acide benzoïque (non phénolique)
 R₁ = R₂ = R₄ = H, R₃ = OH : acide *p*-hydroxybenzoïque
 R₁ = R₄ = H, R₂ = R₃ = OH : acide protocatéchique
 R₁ = R₄ = H, R₂ = OCH₃, R₃ = OH : acide vanillique
 R₁ = H, R₂ = R₃ = R₄ = OH : acide gallique
 R₁ = H, R₂ = R₄ = OCH₃, R₃ = OH : acide syringique

a : Structure chimique de quelques acides hydroxybenzoïques.



R₁ = R₂ = R₃ = R₄ = H : acide cinnamique (non phénolique)
 R₁ = R₃ = R₄ = H, R₂ = OH : acide *p*-coumarique
 R₁ = R₂ = OH, R₃ = R₄ = H : acide caféique
 R₁ = OCH₃, R₂ = OH, R₃ = R₄ = H : acide férulique
 R₁ = R₃ = OCH₃, R₂ = OH, R₄ = H : acide sinapique
 R₁ = R₂ = OH, R₃ = H, R₄ = acide quinique : acide chlorogénique

b : Structure chimique de quelques acides hydroxycinnamiques.

Fig. 1 : Structures chimiques de quelques acides phénoliques

Les coumarines sont de structure C₆-C₃, la chaîne C₃ est sous forme d'un hétérocycle oxygéné

a.2. Les flavonoïdes : Ils contiennent 15 atomes de carbones rangés dans la configuration C₆-C₃-C₆ (deux noyaux aromatiques A et B reliés par un hétérocycle oxygéné C). Les anthocyanes sont des flavones glycosylés en position C₃.

Ce groupe comprend des composés de couleur jaune mais il compte aussi des composés de couleurs variées (bleu, violet, rouge,...) ou incolores.

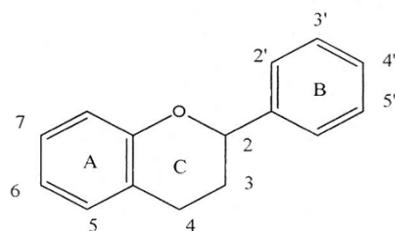


Fig. 2 : Structure de base des flavonoïdes

b. Polyphénols complexes (Tanins)

Obtenus à partir de la condensation des phénols simples. Leurs PM est entre 500 à 3000Da. Ils contiennent un nombre élevé de groupement hydroxyles permettant des combinaisons stables avec les protéines, alcaloïdes,...etc. Ils sont utilisés dans l'industrie de cuir pour leur propriété tannante. On distingue des tannins hydrolysables (esters d'acides phénoliques et des glucides) et des tannins condensés (dimères, oligomères et ou polymères de flavane-3 ol ou de flavane 3,4 diol liés entre eux par des liaisons 4-8 ou 4-6).

I.3.1.2. Extraction des principes actifs et préparation des tisanes

Une tisane est une boisson obtenue par macération, décoction ou infusion de matériel végétal, dans de l'eau chaude ou froide. Elle est riche en principes actifs surtout en composés phénoliques. Ces derniers sont solubles dans les solvants polaires (eau, éthanol, méthanol, acétone). Ils sont extraits par différentes méthodes : Infusion, Décoction et macération.

a. Infusion : C'est sans doute la méthode d'extraction la plus courante et connue de tous. Elle consiste à verser de l'eau à 80° sur des feuilles ou des fleurs et à les laisser infuser pendant quelques minutes. Cette méthode permet d'extraire les principes actifs des plantes ainsi que leurs arômes.

Pour une infusion optimale, il est conseillé de faire bouillir de l'eau (à 100°) puis de la laisser refroidir quelques minutes jusqu'à ce que sa température redescende à 80°. En effet une eau bouillante versée sur les plantes détruit une partie des arômes ou des principes actifs.

Selon la plante que l'on utilise, le temps d'infusion peut varier. Petite règle simple à retenir, plus les feuilles sont fines, plus l'infusion est rapide. Compter au minimum 3 minutes d'infusion, et ne jamais dépasser les 10 minutes, au risque de déguster une infusion un peu trop amère. Il est ensuite conseillé de filtrer votre préparation avant de la boire. L'infusion peut être conservée au réfrigérateur pendant 1 à 2 jours.

b. Décoction : Cette méthode est sensiblement différente de l'infusion, du moins au départ. Cette fois, les parties plantes sont plongées dans de l'eau froide, qu'il faut ensuite monter à ébullition. Lorsque l'eau bout, on peut retirer la casserole du feu puis la recouvrir quelques minutes, pour que la décoction agisse.

A partir du moment où l'eau bout, la décoction dure entre 2 à 10 minutes selon la substance de la plante ou le goût que l'on souhaite obtenir.

La décoction permet une extraction des principes actifs plus complète que l'infusion. Cependant, elle ne s'applique pas à toutes les plantes car pour certaines d'entre elles, la chaleur peut modifier ou atténuer les principes actifs.

Il est préférable d'utiliser la décoction pour les racines, les écorces ou même les graines. Par exemple les queues de cerise ou encore la prêle sont très appréciées en décoction.

c. Macération : La macération est une méthode d'extraction très semblable à celle de l'infusion mais celle ci est plus longue. Elle consiste à laisser reposer la ou les plantes dans un liquide, de l'eau, de l'alcool, de l'huile ou même du vinaigre, afin d'en extraire les principes actifs.

On peut faire au préalable une décoction et ensuite laisser macérer toute la nuit en retirant la source de chaleur, on peut également procéder à une macération à froid dès le départ.

La macération pouvant s'effectuer à froid, ce mode de préparation est tout indiqué pour les plantes fragiles qui ne supportent pas d'être chauffées.

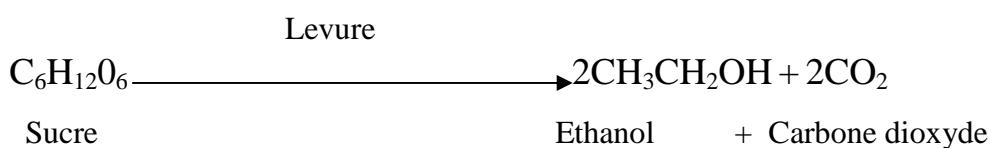
Cette méthode est aussi beaucoup utilisée pour réaliser des macérats huileux. Le macérat huileux est très apprécié pour les soins du corps. Par exemple, il est possible de faire macérer la fleur de calendula dans une huile végétale, pour profiter de ses bienfaits apaisants et nourrissants pour la peau.

I.3.1.3. Rôles des composés phénoliques et utilisations

1. Rôle défensif contre les herbivores (goût désagréable amère attribué aux tanins), inhibition des enzymes gastriques (indigestibilité des protéines végétales).
2. Rôle dans la reproduction (les flavonoïdes colorent les fleurs ce qui exerce un effet attracteur sur les insectes et les oiseaux pollinisateurs assurant la reproduction).
3. Rôle anti oxydant contre les radicaux libres et protègent contre les UV; Ils sont utilisés comme conservateurs et antimicrobien.
4. La consommation des aliments riches en flavonoïdes (cacao, thé, fruits et légumes,...) protège contre les maladies cardiovasculaires, ils ont des propriétés anti-inflammatoires, antiallergiques, anti cancéreuses, anti oxydantes,...etc.
5. Dans le domaine industriel les tanins sont utilisés dans la fabrication du cuire (tannage des peaux).

I.3.2. Cas de boissons fermentées : la bière

Les boissons fermentées sont des boissons obtenues par fermentation du produit de base(orge, raisin, pomme,...etc.). La fermentation alcoolique est une réaction chimique complexe transformant du sucre en alcool et en dioxyde de carbone sous l'action d'un biocatalyseur ; la levure selon la réaction suivante :



La fabrication de la bière passe par plusieurs étapes (Fig.1):

I.3.2.1. Le malteage

Pour produire de la bière, il faut avant tout passer par une étape de malteage. Hydratation, germination, séchage, chauffage et nettoyage : l'objectif est de fabriquer des enzymes chargées de découper les molécules d'amidons non fermentescibles (c'est-à-dire qui ne sont pas susceptibles de fermenter) contenues dans l'orge.

I.3.2.1.1. Trempage : Il correspond à l'humidification et au lavage des grains d'orge. Le premier trempage permet de nettoyer les grains et dure en moyenne 2h. Il sera ensuite suivi de 3 ou 4 lavages successifs et l'ensemble de cette réaction prend entre 60 et 100h, dépendant du

type de grain (épaisseur de l'enveloppe, etc.). Ceci se réalise dans une eau entre 10 et 15°C et engendre un accroissement de l'humidité des grains entre 45 et 54% (se comprime sous les doigts et s'écrase facilement).

I.3.2.1.2. la germination : Elle est essentielle pour la libération des enzymes protéolytiques (diastase,...). Les enzymes sont libérées grâce à la modification de la perméabilité de l'endosperme, lui-même induit grâce à l'apparition de la radicule (ensemble de réactions cellulaires). Tout ce phénomène a pour but la production d'énergie, de protéines (solubilisation) et de carbone pour l'embryon. On ne laissera pas pour autant les enzymes dégrader l'amidon, il sera transformé plus tard.

I.3.2.1.3. Touraillage : Cette opération a pour but de stopper le processus de germination. Elle consiste à dessécher le grain d'orge (changera de nom pour devenir du malt) grâce à un chauffage progressif jusqu'à maximum 105°C. Cette augmentation de température permet de développer les arômes et la couleur du malt, tout en réduisant la teneur en diastases. Ce processus permet également une meilleure conservation du produit (durant 1 an minimum). Pour obtenir du malt foncé, le touraillage se fait le plus souvent par le passage d'un courant d'air chaud et il dure entre 40 et 48h. Le malt est retourné toutes les 2h et on augmente la température progressivement jusqu'à 90-105°C.

I.3.2.1.4. Le dégermage : Consiste à retirer la radicelle (germe) du malt. Cette étape se fait en agitant un tambour et par l'aspiration des poussières et des débris par frottement des grains entre eux. Et pour finir, il y a un polissage du malt par des brosses mécaniques.

I.3.2.2. brassage

Le brassage permet d'activer les enzymes par chauffage. Le mélange obtenu ne doit contenir que des sucres élémentaires fermentescibles.

I.3.2.2.1. Le concassage : Il a pour but de moudre le malt. Une fois l'opération terminée, on obtient de la farine de malt que l'on ajoute dans une cuve remplie d'eau.

I.3.2.2.2. Le brassage proprement dit: On chauffe la cuve en différents paliers de température pour transformer l'amidon en glucose.

a. Le premier est le palier protéinique: au cours duquel la température s'élève jusqu'à 45°C - 55°C pendant 10 à 30 minutes. A l'aide d'enzymes protéinases, on transforme les protéines complexes non dissoutes lors du maltage en acides aminés et protéines simples. Celles-ci jouent un rôle important dans la fermentation de la bière.

b. Second palier : celui de la saccharification. Il permet de former, d'une part, les sucres fermentescibles et, d'autre part, les sucres non fermentescibles. La température doit s'élèver

jusqu'à environ 65°C et rester constante pendant 30 à 60 minutes. Dans ce cas, les sucres fermentescibles, à savoir les amidons, sont modifiés par l'action d'enzymes amylases beta en des molécules plus simples, les maltoses. Ces dernières vont subir d'autres transformations durant l'étape de la fermentation dans laquelle seront transformés en CO₂ et en alcool. Entretemps, les amylases alpha découpent préalablement les chaînes d'amidon pour créer les dextrines. La création des sucres non-fermentescibles recommande d'atteindre une température encore plus élevée, de l'ordre de 68°C à 72°C pendant 30 à 90 minutes. A ce stade, l'amylase beta ne résiste pas et se dénature en laissant seules les amylases alpha agir de leur côté. On assiste à une production accrue de dextrines qui accentue le goût de la bière.

c. Le troisième palier : le dernier palier de température est celui de l'inhibition enzymatique. On atteint environ 80°C pendant 10 à 15 minutes. A cet instant, toutes les enzymes sont éliminées. L'objectif de ce palier est de solubiliser les sucres (glucoses) dans le brassin pour obtenir un meilleur rendement de brassage. Cette efficacité est évaluée en fonction de la quantité de bière que l'on produit pour une quantité fixe de matière première.

I.3.2.3. Cuisson du moût

Après filtration, le moût passe par une phase de cuisson afin de détruire les enzymes restantes. C'est aussi le moment d'incorporer houblon et épices qui vont donner l'essentiel de son goût à la bière. Le moût doit ensuite être à nouveau filtré puis refroidi pour éviter tout risque de contamination. Il est aussi oxygéné pour préparer le travail des levures.

a. Filtration : Le brassin est **filtré** pour enlever tous les résidus solides qui constituent la drêche. Le liquide résultant de cette opération est appelé le moût. Celui-ci est directement mis à ébullition pendant une durée de 1h30 à 2h00 dans une chaudière. Cette étape est définie comme la cuisson. Elle permet de stériliser le moût, c'est-à-dire détruire tous les germes qui pourraient se former à partir d'une quelconque contamination.

b. L'houblonnage : est une opération capitale dans la production de la bière. En effet, l'houblon est l'élément qui détermine à la fois l'amertume et le goût de la bière. Un mauvais dosage peut modifier radicalement l'arôme de la bière. En règle générale, on ajoute quelques dizaines de grammes d'houblon pour un hectolitre de moût.

c. Refroidissement : Pour éliminer toutes les impuretés restantes, on décante (ou centrifuge) le moût et il est ensuite refroidi jusqu'à une température ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) à laquelle les levures ajoutées pourront agir lors de la fermentation.

I.3.2.4. La fermentation

C'est une étape pendant laquelle les levures sont ajoutées dans le moût et ayant pour but de transformer le glucose en gaz CO₂ et en alcool. On met environ un litre de levure pour 100 litres de moût. Deux sortent de levures sont utilisées par la majorité des brasseurs : la *Saccharomyces carlsbergensis* et la *Saccharomyces cerevisiae*. Il existe également deux types de fermentation : la fermentation basse qui consiste à ajouter de la levure basse à une température de l'ordre de 7°C à 11°C. La deuxième est une fermentation haute. Elle se réalise à une température plus grande, de l'ordre de 18°C à 26°C. Elle agit directement et les levures se reproduisent rapidement.

I.3.2.5. Maturation

La bière plate obtenue en fin de fermentation primaire est transférée en chambre froide dans des tanks de garde à 0°C (cuves fermées hermétiquement) où elle va effectuer une maturation. Au bout de 3 à 6 semaines, la bière est propre et peut être conditionnée en bouteilles mais il reste la prise de mousse. Tout le sucre a été consommé pendant la fermentation primaire et secondaire et il convient de rajouter un peu de sucre à la bière plate qui contient encore des levures. Cet ajout permet de rendre la bière pétillante. La prise de mousse dure au minimum 2 à 3 semaines et se fait en chambre « chaude » (à 20 °c). Après cela, la bière peut être dégustée ; Avec modération bien sûr.

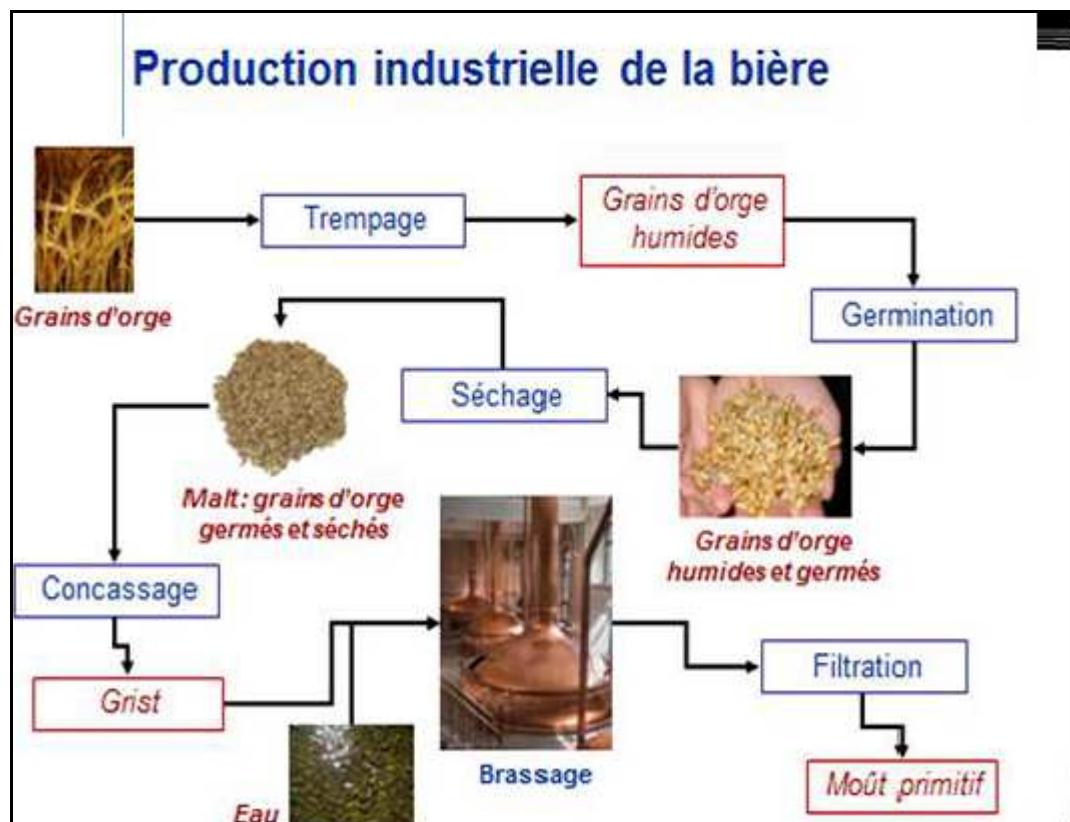


Fig.1 : Production industrielle de la bière

I.4. Plantes à glucides (Cas : cane à sucre et production de sucre roux)

Le sucre (saccharose) est extrait de la betterave sucrière (*Beta vulgaris L.*) ou de la cane à sucre (*Saccharum officinarum L.*). Ces plantes accumulent le sucre, au niveau de la racine pour la betterave ou de la tige pour la cane.

I.4.1. Description de la canne à sucre

La canne à sucre est une plante de la famille des *Poaceae*. Toutes les espèces du genre *Saccharum* sont des graminées vivaces de grande longévité. La plante possède des racines denses qui peuvent s'enfoncer profondément dans le sol. Elles sont pourvues de nombreux poils absorbants qui aspirent l'eau et les sels minéraux du sol. Les tiges peuvent atteindre entre 2,5 et 4 m de hauteur et 1,5 à 6 cm de diamètre, selon les variétés utilisées. Leur écorce épaisse et lisse va du jaune au violet selon les variétés. Les feuilles sont au nombre de 10 sur les plantes en pleine croissance. L'apparition de la floraison marque la fin de la croissance de la plante et le début d'une augmentation sensible de formation de saccharose qui se déclenche sous l'action de la sécheresse et de la fraîcheur nocturne. Cependant, la floraison des plantes cultivées n'est pas désirable du fait qu'elle soutire une partie de l'énergie nécessaire à la croissance végétative de la plante et à la production du saccharose.

Pendant la période qui précède la récolte, la plante fabrique peu à peu son sucre (saccharose) dans les feuilles grâce à l'action conjuguée du soleil, de l'eau et de l'air (photosynthèse). Le saccharose s'accumule dans la tige comme réserve énergétique, mais sa répartition n'est pas égale et le sommet de la plante est d'une moindre teneur en sucre. Les principaux constituants de la canne à sucre sont le sucre et les fibres. La composition moyenne de la canne à sucre est présentée dans le tableau 1. Selon l'état de maturité de la plante, la teneur en fibre peut varier de 10 % à 18 %, la quantité d'eau de 72 % à 77 % et le saccharose de 12 % à 16 %. Après extraction, une tonne de canne produit environ 250 à 300 kg de débris, soit entre 25 % et 30 % de la matière première.

Tableau 1 : Composition moyenne de la canne à sucre.

Composant	Teneur (% MF)
Eau	70
Fibres ligneuses	14
Saccharose	14
Impuretés	2

I.4.2. Procédure industrielle de fabrication de sucre

Le procédé standard d'extraction du sucre de canne est assez semblable à celui du sucre de betterave. Excepté pour l'étape d'extraction initiale, les opérations sont similaires. Le jus de canne subit alors les mêmes opérations que le jus de betterave. Il est chauffé en présence d'agents, tels quel le carbonate de calcium, l'hydroxyde de calcium, le dioxyde de carbone (clarification calco-carbonique) et le dioxyde de soufre, qui précipitent les protéines et autres substances secondaires. Par la suite, la solution sucrée est filtrée et soumise à une évaporation initiale, suivie d'une évaporation à vide jusqu'à la formation d'un sirop présentant des signes de cristallisation initiale. Ce sirop, qui reçoit le nom de masse-cuite, est soumis à une nouvelle évaporation jusqu'à ce que le processus de cristallisation soit avancé. Par la suite, les cristaux de sucre sont séparés du liquide par centrifugation. Le liquide, qui contient encore du saccharose et une petite quantité de sucres non-cristallisables, constitue la mélasse. Le raffinage du sucre brut est donc effectué par la suite dans les « raffineries » situées dans les pays importateurs.

I.4.2.1 Extraction

I.4.2.1.1. Extraction du jus

Les morceaux de canne à sucre passent dans une série de trois moulins cylindriques montés en triangle et tournant lentement (4 à 6 tr/min). La canne subit deux broyages dans chaque moulin donnant ainsi un liquide sucré, le « vesou ». La « bagasse », résidu fibreux qui sort des moulins, sert de combustible à la chaudière qui alimente toute l'usine en vapeur. Les moulins permettent d'extraire 92 % à 96 % du saccharose contenu dans les tiges de canne. Le vesou est de couleur brune assez trouble avec une composition et une qualité qui varient selon la variété et la qualité de la canne. Le saccharose représente entre 10 % et 18 % du vesou (Tableau 2).

Tableau 2 : Composition du vesou.

Composant	Teneur (% MF)
Eau	80-85
Saccharose	10-18
Sucres réducteurs	0.3-3
Composants organiques	0.7-3
Composants inorganiques	0.2-0.6

Les composants non-sucrés retrouvés dans le vesou sont des hydrates de carbone, des composants azotés organiques, des acides organiques, des matières colorées, des cires, des graisses, des sels inorganiques et du silice. Le vesou est notamment riche en sucres réducteurs et en composants phénoliques qui favorisent le développement des couleurs foncées.

I.4.2.1.2 Épuration

Plusieurs raisons expliquent la nécessité d'une épuration du vesou avant concentration puis cristallisation :

- le vesou est d'un aspect noir, grisâtre et opalescent. Il contient des particules en suspension auxquelles adhèrent des flocons de matières protéiques coagulées, et il est difficile de filtrer ces particules car elles collent aux filtres et le jus filtré ne serait pas clair ;
- le vesou est acide (pH 5,6) et le chauffage en évaporation entraînerait une hydrolyse du saccharose avec production de sucres réducteurs qui eux-mêmes se dégradent en formant des matières colorantes ;
- par ailleurs, le vesou mousse fortement du fait de la présence de saponines et il serait donc impossible de l'évaporer tel quel ;
- enfin le vesou contient des impuretés minérales et organiques responsables d'un entraînement de sucre dans la mélasse (Tableau 3).

Le but de l'épuration est donc d'enlever les matières en suspension, de neutraliser le jus et d'enlever le plus possible de non-sucres dissous et aussi les colloïdes. Le vesou qui contient un grand nombre d'impuretés est d'abord épuré par tamisage pour enlever surtout les particules ligneuses, et ensuite par chauffage puis par un traitement à la chaux suivi de deux carbonatations successive.

- Chaulage : Le vesou est chauffé à une température de 80 à 90 °C dans un échangeur de chaleur et mélangé avec le lait de chaux pour obtenir un jus chaulé qui sera mélangé avec le gaz carbonique. Le chaulage assure les réactions de dégradation, coagulation, flocculation et la précipitation et apporte une charge suffisante de chaux qui carbonatée, servira de support de filtration.

Tableau 3 : Composants non-sucrés présents dans le jus de canne

GROUPE	COMPOSANT	TENEUR (%)
Hydrates de carbone	Hémicellulose et xylane	8,5
	Pectines	1,5
Composants azotés organiques	Albumine	7,0
	Albuminoïdes et peptoses	2,0
	Glycine et acide aspartique	9,5
	Asparagine et glutamine	15,5
Acides organiques	Aconitique, oxalique, succinique, glycolique et malique	13,0
Matières colorées	Chlorophylle, anthocyanes et tanins	17,0
Cires, graisse et savons	Cire de canne	17,0
Sel inorganique	Phosphates, chlorures, sulfates, silicates, nitrates de sodium, potassium, calcium, magnésium, aluminium, fer	7,0
Autres	Silice	2,0

- Carbonatation : Le vesou contient une grande quantité de sucre, mais également des impuretés, la carbonatation provoque d'une part la précipitation de la chaux sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3), support d'adsorption des impuretés et d'autre part, elle permet de neutraliser le milieu. La carbonatation s'effectue dans les chaudières de carbonatation, il s'agit de faire barboter le dioxyde de carbone dans le jus de diffusion afin d'avoir la meilleure efficacité de réaction.

La première carbonatation sert à précipiter la chaux en excès dans le vesou sous forme de CaCO_3 , sur les cristaux de carbonate naissants s'adsorbent les impuretés et plus particulièrement les colorants provenant de la décomposition de sucre invertis produit de dégradation alcaline des hexoses. La deuxième carbonatation a pour rôle d'éliminer le maximum de calcium encore en solution dans les sirops de la première carbonatation (Tableau 4).

Tableau 4 : Principales réactions de transformation de la chaux

Préparation de lait de chaux	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + 159 \text{ KCal}$ Lait de chaux
Chaulage	Saccharose + lait de chaux \rightarrow saccharate de chaux
1ère et 2ème carbonations	Saccharate de chaux + $\text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca CO}_3 + \text{saccharose} + \text{H}_2\text{O} + 276 \text{ Kcal}$

Après le chaulage, le vesou est porté à ébullition (105 °C) dans des réchauffeurs afin de favoriser l'insolubilisation du floculat. Dans le clarificateur, le vesou décante et les impuretés noires ou « boues » se déposent au fond. Le jus clair obtenu en surface contient de nombreux sucres réducteurs, car l'épuration ne les détruit pas.

Les boues récupérées au fond du décanteur sont mélangées avec la fine bagasse (adjvant de filtration) et sont filtrées sur des filtres rotatifs sous vide. Le jus obtenu est renvoyé en épuration, tandis que la boue (ou écumes) devient un sous-produit.

I.4.2.1.3. Évaporation et cristallisation

Le jus clair est chauffé à différentes températures dans des évaporateurs à pression réduite. L'eau s'élimine sous forme de vapeur et le sirop est obtenu. Dans des chaudières à cuire, le sirop est chauffé à 55 °C et à pression réduite. Il se transforme en une masse pâteuse (masse-cuite) qui renferme des cristaux de sucre et un liquide visqueux appelé : liqueur-mère.

I.4.2.1.4 Malaxage et turbinage

La masse-cuite est malaxée et turbinée dans une centrifugeuse afin de séparer les cristaux de sucre et le sirop épuisé. On obtient le sucre de premier jet. Le sirop épuisé est malaxé et turbiné à nouveau pour obtenir le sucre de deuxième jet. Le sirop est encore malaxé et turbiné une deuxième fois pour l'obtention du sucre de troisième jet et de la mélasse (Fig.1).

I.4.2.1.5 Séchage : Les cristaux de sucre sont séchés dans des granulateurs à tambour le sucre est appelé « sucre roux ».

I.4.2.2. Raffinage du sucre roux : Le raffinage du sucre de canne brut est fait dans des usines appelées raffineries.

I.4.2.1. Lavage du sucre brut

À la station d'affinage, à l'aide d'un malaxeur, le sucre brut est imprégné dans un sirop saturé qui favorise la dissolution superficielle des cristaux. La couche superficielle des cristaux, la plus impure, est dissoute. La masse-cuite ainsi obtenue est centrifugée pour retirer la mélasse résiduelle en surface. Le sucre obtenu est un sucre d'affinage.

I.4.2.2 Clarification

Le sucre d'affinage est dissous dans de l'eau chaude. Le sirop trouble formé est alcalinisé par addition de lait de chaux. Les impuretés sont retirées par flottaison et filtration.

I.4.2.3. Décoloration

La décoloration du sirop se fait en deux étapes. Le sirop passe par des colonnes de résines. Le sirop devient presque aussi limpide que l'eau.

Les résines sont régénérées par désucrage, à l'aide d'une saumure.

I.4.2.4. Cristallisation, malaxage, turbinage et séchage

La cristallisation du sucre se fait dans des chaudières à cuire pouvant produire jusqu'à 50 tonnes de sucre à la fois. L'eau est évaporée sous vide à environ 70 °C, ce qui économise l'énergie et empêche la caramélation du sucre.

I.4.3. Les sous produits de la transformation de la canne à sucre

I.4.3.1. La bagasse

La bagasse, formée de fibres végétales broyées, peut représenter jusqu'à 30 % de la matière issue de la canne. Elle renferme en moyenne 45 % d'eau, 48,5 % de fibres et 2,5 % de matière dissoute (principalement du sucre). La bagasse servait traditionnellement de source de combustible pour la sucrerie, ainsi que de fourrage pour les animaux et d'engrais. Plusieurs nouvelles applications ont été développées pour la bagasse, par exemple la fabrication de papier, carton et panneaux agglomérés; la fabrication du furfural et l'utilisation comme source d'énergie pour des centrales charbon-bagasse.

I.4.3.2. La mélasse

La mélasse, qui contient 35 % de saccharose et bien d'autres substances (Tableau 4), peut aussi connaître une seconde vie. On produit 30 kg de mélasse par tonne de canne, soit 3 % de la matière première. Une bonne partie de la mélasse produite par les sucreries est utilisée pour la production du rhum industriel. Une autre fraction est utilisée dans l'alimentation des

animaux et une petite partie se retrouve sur les tablettes des supermarchés pour la consommation humaine (préparation de pain d'épice). La mélasse peut aussi être utilisée pour la culture des levures ainsi que, pour la production de divers produits, tels que l'acide acétique (vinaigre), l'acide citrique, le glycérol, l'acide aconitique, le glutamate, la dextrane, l'acide itaconique, la lysine et l'éthanol.

Tableau 4 : Composition moyenne de la mélasse par 100 g de mélasse.

COMPOSANT	SUCRE BLANC
Calories (kcal)	290
Eau (g)	21,87
Hydrates de carbone (g)	74,73
Calcium (mg)	205
Cuivre (mg)	0,487
Fer (mg)	4,72
Magnésium (mg)	242
Manganèse (mg)	1,530
Phosphore (mg)	31
Potassium (mg)	1464
Sélénium (μg)	17,8
Sodium (mg)	37
Zinc (mg)	0,29
Vitamine B1 (mg)	0,041
Vitamine B2 (mg)	0,002
Vitamine B3 (mg)	0,930
Vitamine B5 (mg)	0,804
Vitamine B6 (mg)	0,670

I.4.3. 3. Les boues

Les boues d'épuration renferment une grande quantité de substances organiques, dont des cires et des graisses, qui pourraient être valorisées. Dans certains pays, elles sont utilisées pour fertiliser les sols cultivables.

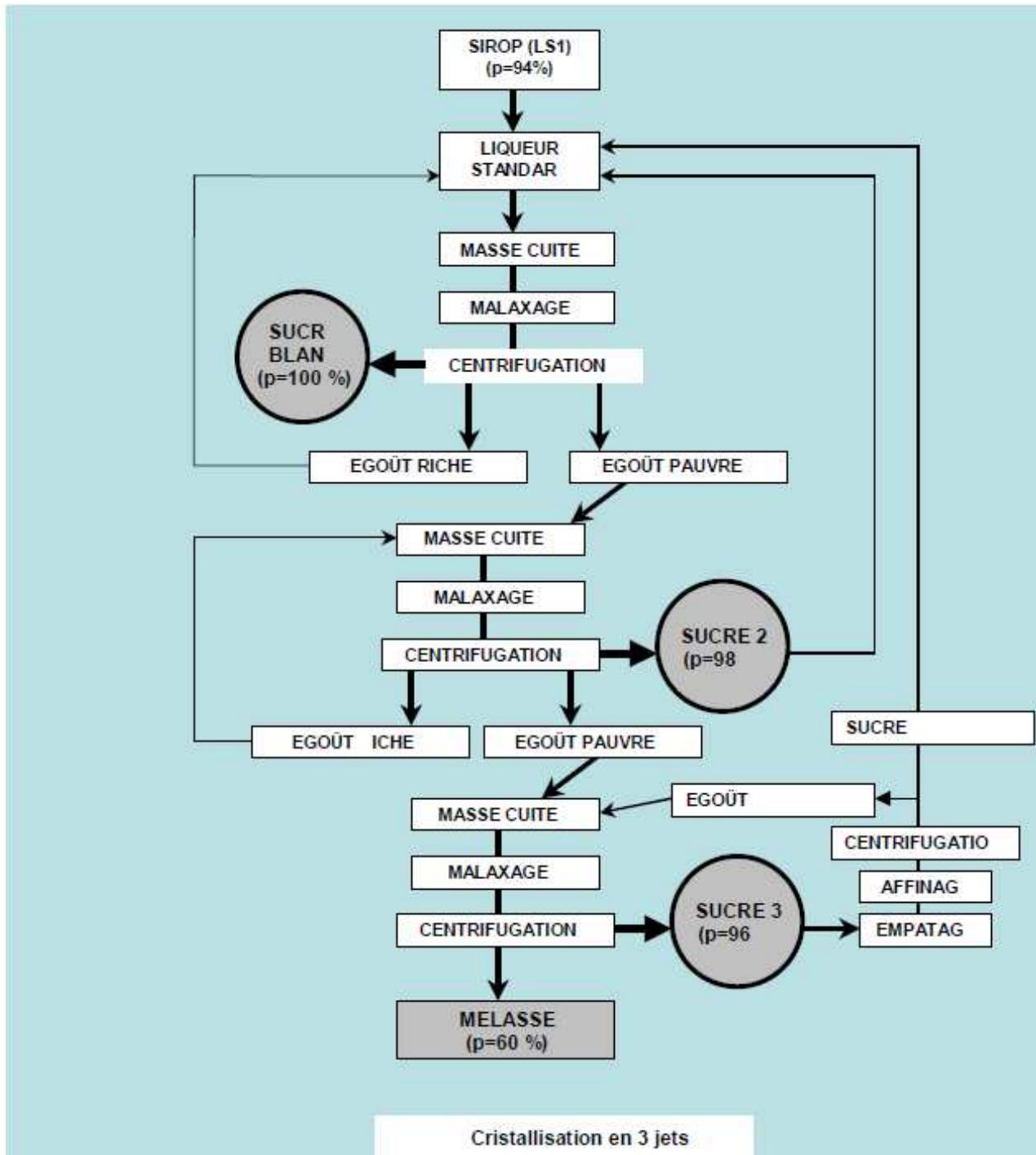


Fig.1 : Cristallisation en trois jets

I.5. Plantes oléagineuses (Cas : olivier et production de l'huile d'olive)

I.5.1. Description

L'olivier est un arbre à tronc droit souvent fissuré à l'écorce grise, de croissance lente et aux petites feuilles opposées vertes argentées. L'olivier présente deux espèces, sous forme sauvage, il se nomme oléastre (*Olea europaea* ssp. *europaea* cv. *Sylvestris*) et sous forme cultivée, olivier (*Olea europaea* ssp. *europaea* cv. *Sativa*).

L'olive est une drupe comestible avec une forme plus au moins ovale. Son poids varie de 2 à 12g et peut atteindre 20 g suivant la variété. Le fruit est composé d'un noyau (endocarpe) et d'une peau épaisse (épicarpe) (Fig.1). Les cellules d'olive contiennent des vacuoles chargées d'huile, à maturation l'épicarpe passe de vert tendre au rouge, au violet plus au moins noir. La figure ci après représente la structure de l'olive et la répartition de ses composés chimiques.

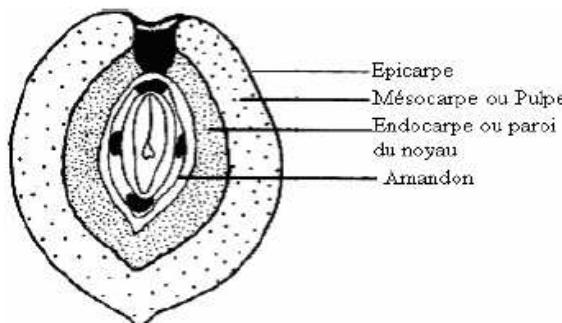


Fig. 1 composition de l'olive

I.5.2. Technologie de transformation

I.5.2.1. Préparation des olives

- **L'effeuillage** : opération nécessaire pour éviter une coloration trop verdâtre de l'huile, se traduisant par un excès d'amertume et par une moindre aptitude à la conservation de l'huile (l'opération peut s'effectuée manuellement ou par des effeuilleuses).
- **Le lavage** : opération fondamentale pour éviter les problèmes suivants :
 - une interférence des terres avec la couleur et les autres propriétés organoleptiques (odeur et gout) de l'huile.
 - une baisse du rendement d'extraction de l'huile.
 - une conservation réduite de l'huile étant donné que certaines traces métalliques dans les terres sont des catalyseurs de l'oxydation de l'huile.

I.5.2.2. Processus technologiques d'extraction et la qualité des huiles d'olives

Les systèmes d'extraction de l'huile d'olive sont essentiellement de trois types :

I.5.2.2.1. Système discontinu par presse

Ce système (Fig.2) est doté d'un broyeur à meules. La pate issue du broyage est empilée sur des scourtins à raison de 5 à 10 Kg/ scourtin puis subi une pression de manière progressive. La durée de l'opération de pressage varie de 45 à 60 min. La séparation de l'huile se fait dans des cuves de décantation, elle doit être opérée au moins une fois toutes les 8 heures, pour éviter un développement d'acidité et des défauts organoleptiques (putride et margines).

Le système par presse (à froid) produit une huile de bonne qualité à condition d'appliquer les bonnes pratiques de fabrication et d'hygiène. Les composants préexistants dans l'olive se retrouvent intacts dans l'huile qui est plus franche et typique. Les scourtins doivent être lavés à raison d'une fois par semaine pour éviter d'augmenter l'acidité de l'huile ou de lui conférer un défaut organoleptique (défaut nommé scourtin). Aussi, les opérations de broyage et de pressage de la pate des olives conduites en pleine air, peuvent entraîner l'altération des huiles de cette pate qui est exposée à l'air libre durant environ 1 heure, parfois plus. En effet, l'auto oxydation de l'huile, déclenchée par la présence de l'air, provoque la dégradation des AGI et par conséquent la formation des hydro-peroxydes qui peuvent se décomposer et donner lieu à des produits volatiles (aldéhydes, cétones,...) conduisant à un état de rancissement oxydatif de l'huile. Un autre inconvénient avec ce système c'est qu'il génère des margines (60 à 70 L/100 Kg d'olives), en plus des huiles et des grignons. Ces margines posent un sérieux problème de pollution de l'environnement.

Le système de presse peut donner une huile riche en polyphénols permettant de la conserver convenablement. Il est utile de rappeler que la capacité de stockage d'une unité doit être adaptée à sa capacité de trituration ; les olives ne doivent pas dépasser plus de 3 jours dans l'unité.

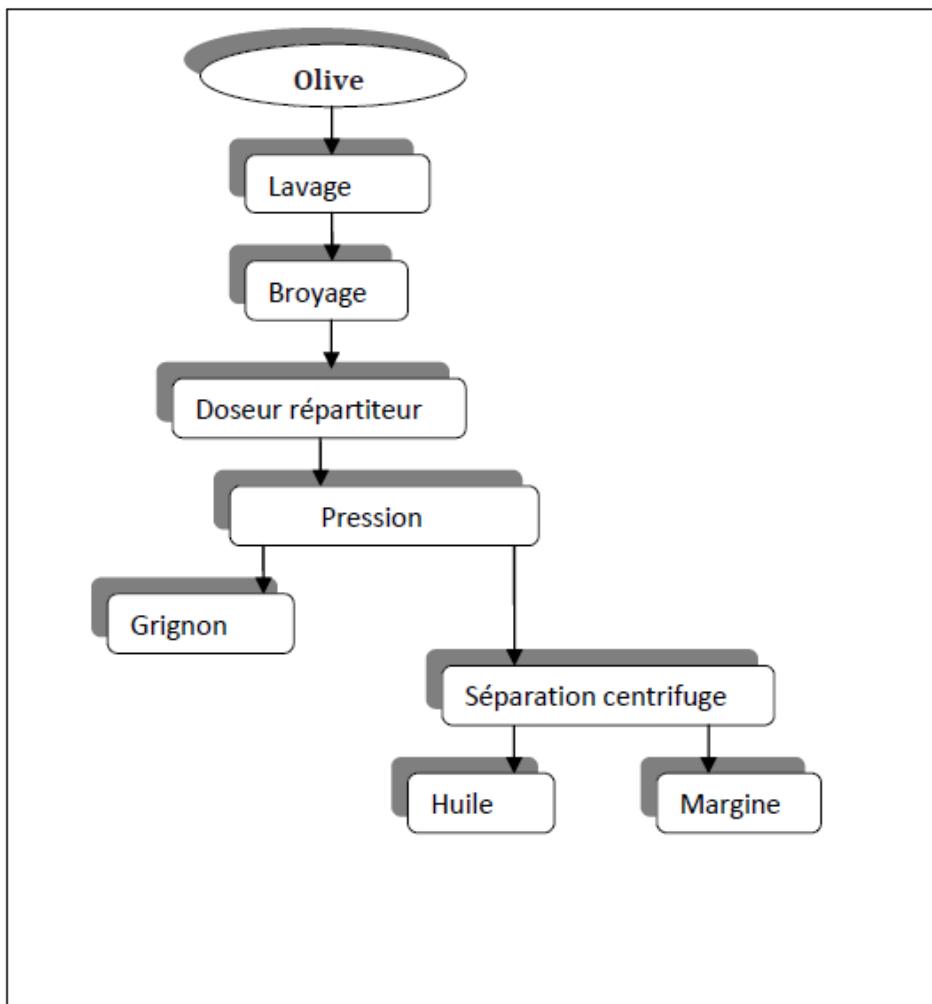


Fig.2 Procédé d'extraction de l'huile d'olive par système de pression

I.5.2.2.2. Système continu

L'introduction des installations continues a permis de réduire la durée de stockage des olives et par conséquent une production oléicole de moindre acidité.

a. Système continu avec centrifugation à 3 phases

Ce système de trituration (Fig.3(b)) fonctionne avec deux centrifugations, la 1ere pour séparer les grignons et les huiles plus margines et la 2eme pour séparer les huiles et les margines. Le système de centrifugation directe des pates nécessite l'addition d'eau tiède (20 à 25°C), ce qui est à l'origine d'un certain nombre d'inconvénients :

- Les polyphénols, tocophérols et le β -carotène étant relativement hydrosolubles passent partiellement dans les margines. L'huile se trouve ainsi appauvrie en polyphénols totaux et en tocophérols responsables de l'action antioxydante. Les huiles contiennent 40 à 50% moins de polyphénols totaux que les huiles extraites à partir des mêmes olives par les systèmes de pression ou de centrifugation à deux phases. Il en résulte une moindre résistance de l'huile à l'oxydation.

- Le système génère un volume considérable de margines. La teneur en huile de ces margines est variable (3 à 5 g/L).

- Le système donne lieu à des grignons à teneur élevée en humidité (45 à 55%).
- Une consommation élevée d'eau et d'énergie thermique.

b. Système continu avec centrifugation à 2 phases

Ce système de trituration (Fig.3(a)) fonctionne avec une centrifugation permettant de séparer l'huile et le grignon humidifié par les eaux de végétations provenant de l'olive. Ce système ne nécessite pas l'adjonction d'eau pour la séparation des phases huileuses et solides contenant les grignons et les margines.

Le système est caractérisé par sa capacité de traitement qui est élevé (jusqu'à 100 tonnes / jour) et sa durée de chômage des olives dans l'attente de leur transformation qui est considérablement réduite, ce qui s'est traduit par une diminution de l'acidité des huiles produites. Il permet en outre l'obtention de rendement en huile légèrement plus élevés que ceux obtenus par le système à 3 phases et le système de presse. Le décanteur à deux phases permet d'obtenir des huiles d'olives plus riches en polyphénols totaux et en tocophérols (et donc plus stables) que les huiles obtenues avec le décanteur à 3 phases et par presses parce qu'il ne nécessite pas d'eau tiède pour la dilution de la pâte. Le décanteur à deux phases ne produit pas beaucoup d'effluents liquides (margines). Il permet aussi de faire une économie en eau et en énergie thermique.

Les grignons issus des décanteurs à deux phases, en plus à une humidité élevée, sont relativement riches en sucres, protéines, polyphénols,...etc. Leur valorisation par compostage pourra être envisagée.

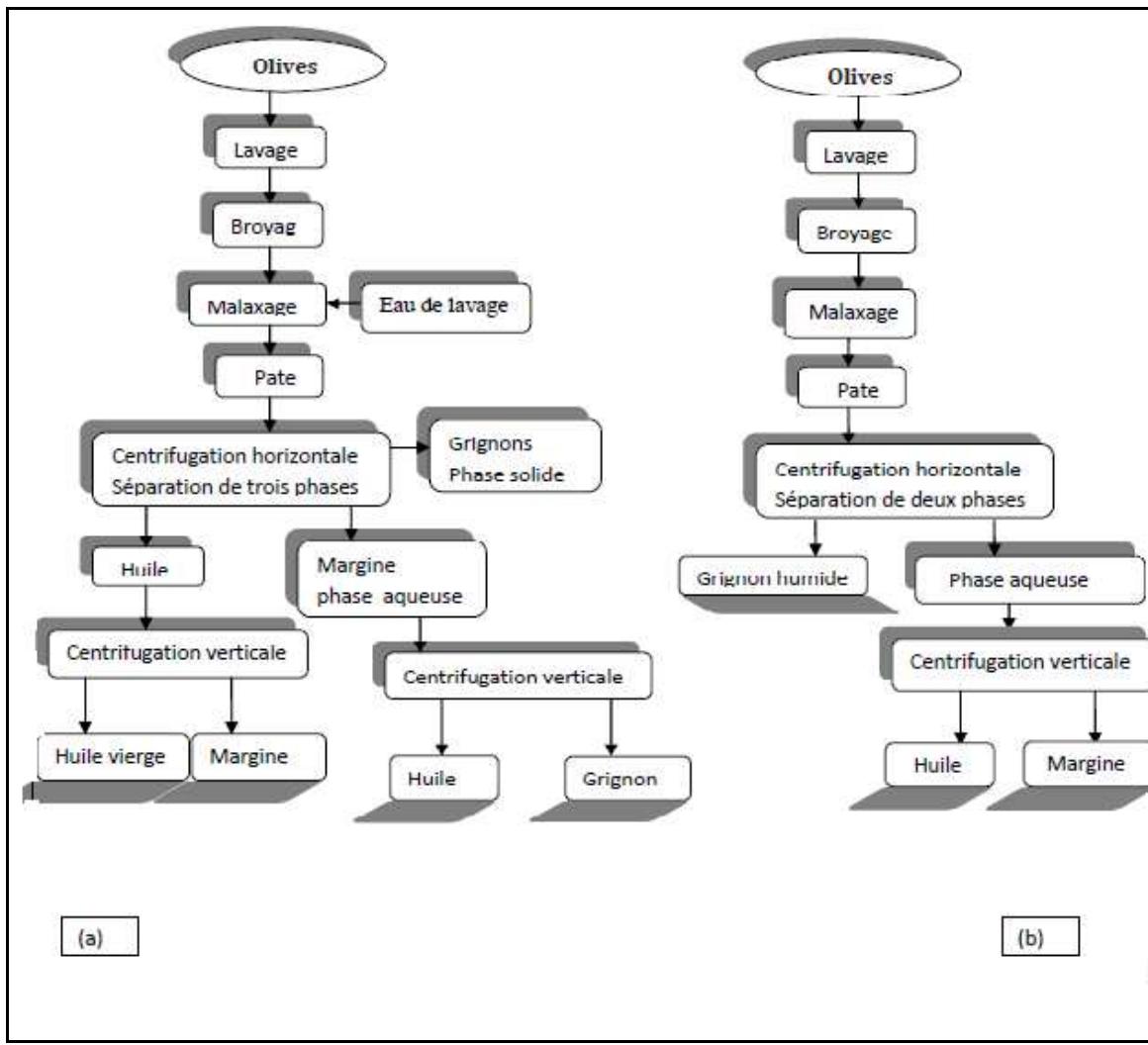


Fig. 3: Procédé d'extraction de l'huile d'olive par centrifugation (a) deux phases (b) trois phases

I.5.3. Les facteurs influençant la qualité de l'huile d'olive

La qualité de l'huile d'olive varie en fonction de la variété, du sol, des conditions climatiques, taux de maturation des olives, les ravageurs et les maladies parasitaires, le stockage des olives avant mouture mais également avec le procédé d'extraction et l'incidence du stockage et de la conservation de l'huile.

I.5.4. Valorisation des sous produits de transformation

I.5.4.1. Valorisation des grignons

- Le grignon, peut être utilisé après épuisement et séparation de la coque, des feuilles et brindilles comme aliment pour le bétail.

- La coque du grignon impropre à la consommation animale, peut être utilisée comme combustible ou pour d'autres fins industrielles comme la production du furfural. Le grignon d'olive est un combustible de valeur calorifique moyenne (2950 Kcal/kg). Cette quantité de chaleur est apportée principalement par la coque qui représente 60% du total et qui a un pouvoir calorifique relativement élevé (4000 Kcal/kg). La pulpe n'apporte que peu de calories.
- L'épandage du grignon comme fertilisant est à éviter car le grignon est un produit difficilement dégradable à cause de sa richesse en lignine et à savoir sa phytotoxicité. Donc pour pouvoir l'utiliser comme fertilisant, il est recommandé de lui faire subir un compostage (processus bio-oxydatif contrôlé sous l'action de microorganismes) qui génère une matière organique stabilisée non phytotoxique.
- La production de l'huile de grignon d'olive.

I.5.4.1. Valorisation des margines

- Utilisation des margines comme fertilisant : De part leur teneur élevée en minéraux, les margines peuvent être utilisées comme fertilisant. Elles apportent 3,5 à 11 kg de K₂O, 0,6 à 2 kg de P₂O₅ et 0,15 à 0,5 kg de MgO par m³. Les essais réalisés permettent de fixer certaines précautions à savoir : ne pas dépasser la dose de 30 m³/h à l'an, arroser toujours entre les arbres et pour les cultures annuelles, arroser au moins 1 mois avant les semaines, pour éviter les effets phytotoxiques et ne jamais arroser pendant la période de végétation.

- Après des traitements d'épuration appropriés, les margines sont utilisées comme matières premières pour la production de biogaz. Ce processus de digestion anaérobiose implique la rupture de la substance organique par des réactions biochimiques qui transforment les grandes molécules en petites molécules, jusqu'à leur transformation en méthane et en gaz carbonique.

- Récupération de quelques composants, en particulier des composants aromatiques et phénoliques et des solutions de glucides.

- La production d'enzymes atteint jusqu'à 29,5 U/ml après élimination des polyphénols par flocculation. Ces enzymes ont été testés pour l'amélioration du système d'extraction d'huile d'olive. L'addition de 2 litres d'une solution de ces enzymes concentrée par ultrafiltration (90 UV/ml) pendant un cycle de broyage, a augmenté le taux d'extraction de 84,3 % à 90,7 %.

Chapitre II. Utilité des biomolécules dans la maîtrise et l'amélioration des propriétés technologiques fonctionnelles

II.1 Maîtrise des qualités organoleptiques des aliments

Les enzymes jouent un rôle important dans les caractéristiques des aliments. Elles agissent :

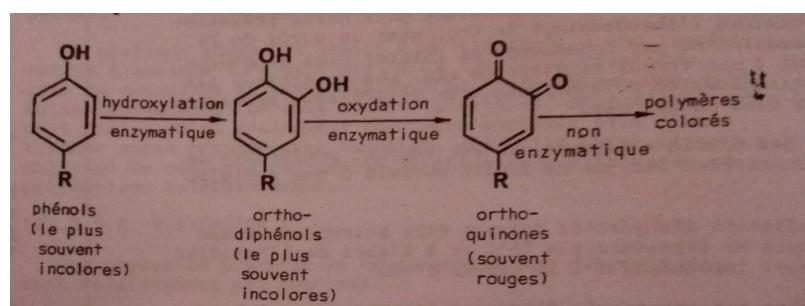
- soit en étant présentes naturellement dans les matières premières animales (lipase et protéase du lait et de la viande) ou végétales (protéase, oxydase et lipase dans les graines) ;
- soit en provenant de micro-organismes contaminants ou ajoutés sous forme de levain (amylase de levure, lipase et protéase de champignon ou bactérie intervenant dans l'affinage des fromages) ; ces micro-organismes produisent souvent plusieurs enzymes capables de catalyser une séquence de réactions (par exemple, c'est le cas des préparations de souches aromatisantes) ;
- soit sous forme de préparation purifiée ajoutée à l'aliment ; c'est le cas pour la chymosine, enzyme responsable de la coagulation du lait, pour les pectinases, enzymes permettant de réduire la viscosité des jus de fruits (enlever le trouble).

Beaucoup d'autres enzymes sont utilisées en technologie alimentaire pour modifier la texture (protéases, amylases...), l'arôme (lipase) ou la saveur (protéase).

La maîtrise des propriétés sensorielles passe nécessairement par l'inhibition de certaines activités enzymatiques indésirables (Exp. Le traitement thermique (blanchiment) de végétaux nécessaire pour détruire les oxydases responsables de brunissement et de défauts de goût) ou par des pratiques technologiques bloquant ces activités (ajout des additifs, congélation, surgélation).

A. Brunissement enzymatique (BE) et prévention

On appelle BE la transformation enzymatique de composés phénoliques en polymères colorés, le plus souvent bruns ou noirs. Le BE s'observe chez les végétaux qui sont riches en composés phénoliques. Les étapes de cette transformation sont les suivantes :



Il existe plusieurs moyens pour empêcher le BE :

- L'addition des composés réducteurs qui transforment les quinones en phénols, permet de retarder ou d'empêcher le BE. Le composé le plus employé est l'acide ascorbique (vitamine C).
- Immersion des fruits après le pelage ou le découpage dans de l'eau légèrement salée ou dans une solution de saccharose ou de glucose, limite l'accès de l'oxygène jusqu'au tissus végétale et son absorption par ce dernier.
- L'abaissement du pH ralentit le BE on emploie en général des bains d'acide citrique
- la désoxygénéation est très efficace contre l'action des poly phénols oxydases. Elle est obtenue par : le vide, le barbotage d'azote, ajout d'acide ascorbique ou par l'action de la glucose oxydase et de la catalase. La désoxygénéation doit toujours être suivie sans tarder d'un traitement de conservation (congélation ou déshydratation).
- Inactivation des enzymes par la chaleur (blanchiment). **Le blanchiment** : est une brève pré cuisson à l'eau ou à la vapeur, à laquelle on soumet les aliments végétaux qu'on consomme habituellement à l'état cuit que l'on se propose de les conserver par appertisation ou déshydratation ou congélation.

B. Brunissement non enzymatique (BNE) apparu lors des traitements thermiques des produits et prévention

Le terme non enzymatique (BNE), désigne un ensemble de réaction aboutissant à la formation de pigments bruns ou noirs et souvent des modifications favorables ou déagréables de l'odeur ou de la saveur. Le BNE est appelé également « réaction de Maillard », « caramélation » ou formation de mélanoïdes ». Il existe plusieurs moyens pour empêcher le BNE :

- Elimination des substrats : avant la déshydratation, on peut oxyder le glucose en acide gluconique au moyen de glucose oxydase, ou bien l'éliminer par fermentation.
- Lors de la reformulation de certains aliments on évite toute addition de sucres réducteurs, le saccharose n'est utilisé qu'à des doses modérées, il est incorporé aux produits autant que possible après le traitement thermique.
- L'abaissement de pH peut permettre dans certains cas de ralentir le brunissement mais il faut évidemment que le produit se prête à une acidification qui doit d'ailleurs rester modérée.

- Addition d'agents inhibiteurs : le seul agent inhibiteur efficace de BNE est l'acide sulfureux, utilisé sous forme de gaz ou de sels (HSO_4Na). Les sulfites réagissent avec les composés carbonylés en donnant des sulfonates stables. En fixant ainsi les intermédiaires les plus réactifs du BNE, les sulfites allongent la période d'induction et retardent l'apparition des pigments.
- Surveillance de la température et de l'humidité.

II.2 Amélioration de propriétés technofonctionnelles

Les enzymes sont utilisées pour maîtriser et/ou pour améliorer les propriétés technofonctionnelles des aliments. Dans le tableau 1 sont résumés les effets principaux des activités enzymatiques sur les propriétés fonctionnelles des produits alimentaires.

II.2.1. Enzymes de dépolymérisation

La protéolyse limitée permet en général :

- une amélioration de la solubilité des protéines ;
- une diminution de la viscosité et de la fermeté de gels protéiques ;
- un accroissement des propriétés tensioactives des protéines de masse moléculaire élevée pour des degrés d'hydrolyse faibles mais, au contraire, une perte de la capacité stabilisante d'émulsion pour des degrés d'hydrolyse élevés.

L'hydrolyse limitée des glycannes (amidon, pectines...) a les effets suivants :

- baisse de rétention d'eau et de viscosité ;
- baisse de fermeté des gels.

Quant à la **lipolyse**, elle permet, grâce à la libération d'acides gras, d'améliorer les propriétés liantes et émulsifiantes des ingrédients lipidiques.

II.2.2 Enzymes de polymérisation

La transglutaminase a été utilisée pour former des ponts covalents entre groupes amides de l'asparagine et la glutamine. Cette réaction, peut conduire à la formation de polypeptidiques qui sont aptes à fixer beaucoup d'eau. Selon le degré de réticulation, on obtient un accroissement de la viscosité et même une gélification de solutions. C'est ainsi que les protéines de soja, de blé, les caséines, la myosine sont utilisées pour former des films, des gels et stabiliser des émulsions.

Tableau 1 : Quelques effets des activités enzymatiques sur les propriétés fonctionnelles

Enzymes	Ingédients	Effets sur les propriétés fonctionnelles
Hydrolyse des protéines		
Protéases	Protéines de muscle (viande, poisson) Concentrés protéiques, lactosérum Caséine native (micelles) Caséinates Globine du crû	Attendrissement, solubilisation.
Phosphatases (microbienne acide et alcaline)	Gluten Caséine native	Solubilisation. Propriétés tensioactives accrues. Coagulation présumée Propriétés tensioactives accrues Solubilisation et décoloration Solubilisation. Propriétés tensioactives
Hydrolyse des glycannes		
β -Galactosidase	Lactose \rightarrow glucose + galactose	Perte de structure compacte Accroissement de la protéolyse (coagulation)
Invertase	Saccharose \rightarrow glucose + fructose	Accroissement de la solubilité et du pouvoir sucrant
α et β -Glucosidase	Glycoprotéines du blanc d'œuf	Accroissement de la solubilité et du pouvoir sucrant
Pectinases	Pectines	Diminution du pouvoir moussant Déméthylation \rightarrow accroissement de la dépendance de la gélification vis-à-vis du pH
Polyméthylestérases + Polygalacturonases		Hydrolyse de liaisons osidiques \rightarrow baisse de viscosité
microbiennes		
Hydrolyse des lipides		
Lipases microbiennes	Triacylglycérols en émulsion	Libération de mono et diacylglycérols tensioactifs Libération d'acides gras volatils (arômes)
Oxydoréductases		
Glucose oxydase	Blanc d'œuf (élimination du glucose)	Poudre insensible aux réactions de Maillard
	Acide linoléique	Composés odorants (aldéhydes, lactones)
	Concentrés protéiques contaminés par lipides insaturés	Perte de solubilité
Enzymes de synthèse		
Phosphokinase	Caséines et protéines diverses	Gélification en présence de Ca++
Transglutaminase	Protéines \rightarrow polymérisats	Gélification

II.2.3. Oxydoréductases

Ces enzymes jouent un rôle essentiel dans les industries agroalimentaire. Leur action peut se résumer en quelques lignes :

La production de radicaux libres, l'oxydation des lipides insaturés ou d'autres substrats oxydables (polyphénols, par exemple) provoque généralement des réactions de polymérisation des protéines (formation de ponts disulfure ou de ponts carbonylamine) avec une perte de solubilité et d'une grande partie des propriétés tensioactives.

III.2.4. Enzymes de modification de chaînes latérales de macromolécules

Les pectineméthylésterases associées aux pectinases hydrolysent les fonctions esters des pectines dont elles modifient le degré de méthylation ; cette réaction aboutit en général à des degrés de méthylation compris entre 10 et 30 % et modifient ainsi le phénomène de gélification et les conditions optimales de pH et de composition minérale (Ca^{++}) qui y sont reliées. La gélification dans ce cas nécessite la présence des ions Ca^{++} et un pH basique. Alors que pour des pectines fortement méthylées le phénomène de gélification requiert un pH acide, la cuisson et la présence du saccharose à 60%.

Chapitre III. Principales application des biomolécules d'origine végétale en industries alimentaires

Les biomolécules végétales regroupent l'ensemble des molécules synthétisées par un organisme végétal. Elles participent au processus métabolique et à l'entretien de l'organisme et elles sont utilisées en industrie agroalimentaire pour leurs propriétés en tant qu'additifs de formulation (tensioactifs, moussants et autres propriétés actives) et en tant que intermédiaires chimiques pour la synthèse d'autres molécules ou modifiées sous l'action de biocatalyseurs endogènes ou exogènes pour l'amélioration des propriétés technofonctionnelles des aliments.

III.1. Usage dans la fabrication des produits céréaliers

Étant donné la prépondérance et la diversité des macromolécules végétales dans le monde vivant, les possibilités d'applications des enzymes pour transformer et modeler les matières premières végétales sont innombrables.

L'utilisation de différentes enzymes permet d'améliorer la qualité des produits de **boulangerie et de pâtisserie** :

— L'apport d' α - et β -amylase à la farine de blé permet d'accroître un peu la teneur en oses libres fermentescibles (en moyenne de 1 à 2 % dans la plupart des farines). Cet apport permet une **meilleure fermentation** avec production de gaz et un bon gonflement de la pâte boulangère : on obtient des pains bien lacunaires, non collants. De plus, on peut déterminer la proportion de dextrines produite en réglant le rapport α/b des amylases de la farine. On limite ainsi la réaction de Maillard à la cuisson et on obtient des croûtes ni trop épaisses, ni trop colorées.

— L'hydrolyse partielle des constituants du gluten par un apport de protéases bactériennes avant la formation de la pâte coupe certaines liaisons endopeptidiques, ce qui **réduit l'élasticité et améliore l'extensibilité** de la pâte ; en conséquence, le pétrissage mécanique devient plus efficace car la déchirure de la pâte ne se produit plus.

— De même, avec certaines exopeptidases fongiques, on accroît la libération d'acides aminés, modulant ainsi la réaction de Maillard, donc ses conséquences sur la flaveur du pain, la consistance et la couleur de la croûte.

— Les hémicellulases jouant un rôle en panification ont essentiellement comme substrat les pentosanes des farines. Les farines de blé contiennent en effet entre 2 et 3 % de pentosanes

constitués principalement de D-xylose et de Larabinose. En conséquence, les enzymes efficaces sont principalement des endoxylanases. Ajoutées à une dose optimale aux farines (entre 50 et 100 ppm), ces biocatalyseurs convertissent en partie les pentosanes insolubles, à caractère défavorable pour la qualité boulangère, en pentosanes solubles qui sont eux bénéfiques. Cela se traduit par une amélioration des caractéristiques de pâte (extensibilité, élasticité, collant) et de pain (volume, aspect, mie). En cas d'addition excessive, une trop forte proportion de pentosanes est dégradée ce qui rend les pâtes molles et collantes.

— La farine contient également une acide ascorbique oxydase. Elle catalyse l'oxydation par l'oxygène moléculaire de l'acide L-ascorbique - additif couramment utilisé en panification - en acide L-déshydroascorbique. Ce dernier oxyde le glutathion en présence de glutathion déshydrogénase. Le glutathion oxydé devient alors indisponible pour participer aux réactions d'échange de ponts disulfures avec les protéines ; il en résulte un raffermissement de la pâte.

— L'utilisation de différentes enzymes permet d'exprimer le pouvoir sucrant (Invertase : saccharose \longrightarrow glucose + fructose) et d'améliorer la qualité des produits de boulangerie et de pâtisserie.

Parmi les autres oxydoréductases présentes dans la pâte, il convient de mentionner :

— les polyphénol oxydases qui oxydent les composés phénoliques pour former des quinones, lesquelles, après une série de réactions, conduisent à des polymères colorés en brun ;
— la glucose oxydase qui catalyse l'oxydation du glucose en D-gluconolactone et eau oxygénée. Cette enzyme n'existe pas dans la farine mais l'utilisation de préparations fongiques de glucose oxydase a été préconisée dans le but de raffermir les pâtes.

III.2. Usage dans la préparation des fruits et légumes

Les enzymes de **macération** sont caractérisées par leur forte activité polygalacturonase. L'action de ces biocatalyseurs se limite à une hydrolyse partielle des pectines de la lamelle moyenne, suffisante pour dissocier les cellules tout en les conservant intactes en suspension dans un jus rendu visqueux par la présence des pectines solubilisées. Du reste, la charge des pectines solubilisées et dégradées est importante pour la stabilité et la qualité des produits obtenus.

Dans le cas de la **liquéfaction** de tissus végétaux l'hydrolyse de la paroi cellulaire doit être plus importante que lors de la macération. Il s'agit non seulement de désorganiser les tissus, mais également de favoriser l'écoulement du cytoplasme et du contenu vacuolaire. Par conséquent, la liquéfaction la plus performante est obtenue par l'action simultanée des enzymes pectinolytiques et cellulolytiques.

Exemple

Dans le cas du jus de pomme, la baisse de viscosité est obtenue par une activité combinée de la pectine estérase et de l'endo-polygalacturonase sur des pectines hautement estérifiées en solution ; la clarification du jus de pomme est possible avec la pectine lyase mais cette enzyme est moins efficace dans la clarification du jus de raisin qui contient entre 45 et 60 % de pectines estérifiées. Il faut une concentration préalable (à 45-50 °C) pour arriver à une clarification et dépectinisation complètes. L'enzymage avant pressurage entraîne une baisse de viscosité qui améliore la filtrabilité des jus. Il permet de réduire le temps de filtration lors de la clarification des moûts, ainsi que le temps et l'énergie nécessaires à l'évaporation des jus limpides pour la fabrication des concentrés.

Tableaux I: Principales pectinases

Nom	Nº	Type	Substrat	Produits
Pectine méthylestérase	EC 3.1.1.11	Hydrolase	Haut DM	Méthanol + GalA
Polygalacturonase				
endo	EC 3.2.1.15	Hydrolase	Pectate	Chaînes plus courtes, oligos
exo	EC 3.2.1.67	Hydrolase	Pectate	Mono OU dimère
Pectine-lyase	EC 4.2.2.10	Lyase;	Haut DM	Chaînes plus courtes
		endo		
Pectate-lyase	EC 4.2.2.2	Lyase	DM bas	
endo	EC 4.2.2.9	Lyase		Dimères
exo				

III.3. Usage dans la transformation des matières grasses

La lipolyse permet grâce à la libération d'acides gras :

1—d'améliorer les propriétés émulsifiantes des ingrédients lipidiques : libération des mono et diacylglycérols tensioactifs.

La digestibilité des lipides peut être améliorée soit en réalisant des hydrolyses partielles, soit en accroissant l'interface entre la phase lipidique et la phase aqueuse pour augmenter la surface réactionnelle. La mise en œuvre de lipases associée à des traitements d'homogénéisation permet d'y parvenir ; l'hydrolyse doit être partielle, d'une part, pour éviter l'apparition de flaveurs indésirables et, d'autre part, pour accroître le taux de mono- et de diacylglycérols qui, par leur caractère amphiphile, réduisent la tension interfaciale et permettent d'accroître la surface interphasique.

2— Libération des AG volatils et amélioration de la flaveur des aliments : L'hydrolyse des acylglycérols conduit en effet à des acides gras qui ont une action importante sur les caractéristiques olfactives de certains fromages et notamment les pâtes persillées (roquefort, bleu des Causses, bleu d'Auvergne...) par suite de leur transformation en cétoacides, méthylcétones, lactones. Ainsi, Certains acides gras, comme les acides caproïque (C6 :0), caprylique (C8 : 0) et caprique (C10 : 0) donnent un goût piquant, poivré au fromage.

III.4. Usage dans les produits laitiers

La première étape de la transformation du lait en fromage est la coagulation. Quand elle s'effectue par la voie enzymatique, elle résulte d'une déstabilisation de la fraction caséinique par hydrolyse spécifique de la caséine capa (liaison Phe105Met 106) sous l'action de chymosine. Dans la présure extraite de la caillette de veau nourri au lait, cette enzyme se trouve en compagnie d'une autre protéase coagulante : la pepsine.

Il existe quatre sources principales de présure: la présure animale (extraite de l'estomac des veaux ou de porc), la présure microbienne, la chymosine recombinante obtenue grâce aux OGM (organismes génétiquement modifiés) et la présure végétale, issue des plantes.

La plupart des fromagers utilisent aujourd'hui de la présure animale, mais plus récemment, divers facteurs ont conduit à un regain d'intérêt pour l'utilisation de sources d'origine végétale dans la fabrication du fromage. Parmi ces facteurs, on trouve le prix élevé et la disponibilité les ressources en quantités limitées d'estomacs de ruminants, les régimes alimentaires tels que le lacto-végétarisme, les restrictions religieuses (halal par exemple) ou l'interdiction de la présure de veau recombinante dans de nombreux pays européens (France, Allemagne et Pays-Bas).

Remplacer la présure animale par des enzymes extraites de plantes pour fabriquer du fromage n'est toutefois pas la solution la plus simple. En effet, ces enzymes péjorent la saveur et la

qualité de la texture du fromage. Elles ont également un rendement inférieur à celui d'autres sources de présure.

Parmi les plantes habituellement employées comme source de présure végétale on trouve : le Gaillet jaune (*Galium verum*), le chardon, l'artichaut et d'autres espèces du genre *Cynar*, l'ortie piquante (*Urtica dioica*) et le pommier Sodome (*Calotropis procera*) et le figuier (*Ficus carica*).

III.5. Usage dans les produits carnés

Les enzymes protéolytiques musculaires jouent un rôle très important dans le processus d'attendrissage des viandes. Elles sont en effet responsables des altérations structurales et biochimiques des muscles conduisant à une fragilisation de ce tissu et, par voie de conséquence, à l'amélioration de sa tendreté, qualité la plus recherchée par le consommateur. La variabilité importante de cette qualité, qui a pour origine une grande diversité des matières premières, a conduit les industriels à s'intéresser aux technologies d'attendrissage « artificiel » des viandes et, plus particulièrement, à celles qui font appel à des enzymes exogènes comme la papaïne, la ficine ou les collagénases.

L'attendrissage artificiel n'offre d'intérêt que pour la viande bovine car les viandes de porc, d'agneau ou de volaille sont généralement suffisamment tendres du fait de l'âge d'abattage de ces animaux qui est physiologiquement très bas. L'attendrissage enzymatique de la viande grâce à l'action de protéases exogènes d'origines diverses est interdit en France au niveau industriel. Seule l'utilisation de sels attendrisseurs est autorisée et cette autorisation ne concerne que la papaïne, enzyme extraite de la papaye. Le sel attendrisseur à base de papaïne est exclusivement réservé à la consommation domestique avec une proportion de papaïne comprise entre 20 et 30g/kg de sel de cuisine. Par contre, l'utilisation d'extraits de fruits (papaye, ananas) est autorisée. Compte tenu que la viande est généralement stockée à basse température, ces protéases ne seront pleinement actives que lors de la cuisson. Pour la papaïne, l'optimum d'efficacité est atteint aux environs de 40-50 °C et son activité ne cessera qu'après dénaturation de l'enzyme elle-même par la chaleur, dénaturation qui intervient aux environs de 75-80 °C. Pour cette raison, les sels attendrisseurs sont ajoutés à la viande juste avant cuisson.