

QUALITE TECHNOLOGIQUE DE L'ORGE (*)

Jean-Claude AUTRAN
 Laboratoire de Technologie des Céréales, I.N.R.A.,
 2 Place Viala, 34060 MONTPELLIER CEDEX 1

Introduction

La culture de l'orge a débuté il y a environ 8000 ou 10000 ans dans le Moyen-Orient (Palestine, Mésopotamie, Anatolie, Afghanistan, Ethiopie) à une époque où les sélectionneurs de plantes - probablement des femmes pour la plupart - ont sélectionné et multiplié des types d'orge à gros grain et à rachis flexible, pouvant se battre facilement. Les grains étaient décortiqués, puis broyés et cuits sous forme de pains ou de galettes, constituant une importante nourriture de base. Simultanément, l'orge a été utilisée pour la fabrication de bière (Egypte, Soudan, Mésopotamie) grâce à sa richesse en amidon, en β -amylase native, mais aussi parce que l'orge est une céréale à grains vêtus (enveloppes ou pailles), enveloppes qui vont être utilisées lors du maltage afin de protéger l'embryon en développement et pour faciliter la filtration au brassage. Si, assez rapidement, l'introduction du blé tendre avec son caractère panifiable unique après fermentation, fit que les sociétés se tournèrent plutôt vers le blé (l'utilisation des grains et farines d'orge en alimentation humaine devenant marginale dans de nombreux pays), il n'en fut pas de même de l'utilisation en malterie-brasserie qui n'a cessé de se développer. Malgré le débouché considérable que représente l'alimentation animale dans le monde, l'utilisation de l'orge en malterie-brasserie, bien que minoritaire (10 % de la production totale d'orge), demeure essentielle au plan commercial et financier et fait appel à des technologies très avancées. Il faut enfin souligner que, après quelques millénaires, la détérioration de l'environnement a amené à réintroduire une culture massive de l'orge, davantage tolérante au sel. C'est précisément sa grande adaptabilité qui fait que l'orge a pu se maintenir en tant que quatrième des céréales pour la production annuelle (170 millions de tonnes dans la période 1985-1990), après le blé, le riz et le maïs, et avant le sorgho.

| | |
|----------|----|
| URSS | 53 |
| Canada | 12 |
| Espagne | 10 |
| France | 10 |
| RFA | 10 |
| GB | 9 |
| USA | 8 |
| Danemark | 4 |
| etc. | |

 Monde 170 millions de tonnes

Nous allons donc développer successivement les principales utilisations agro-alimentaires de l'orge en donnant une large place à la malterie-brasserie (A) et une place plus modeste aux autres usages en alimentations humaine (B) et animale (C).

(*) Conférence au Séminaire de formation ICARDA "Stratégies de sélection pour l'amélioration des céréales (orge et blé) en conditions arides, Montpellier, 18-29 novembre 1991.

Nous détaillerons notamment:

- Les procédés de transformation,
- La définition de la qualité et de ses bases biochimiques, génétiques ou physiologiques,
- La traduction de la demande qualitative de l'industrie ou du consommateur en termes d'objectifs de sélection et de production de l'orge brassicole.

Nous verrons que ces différentes utilisations ne correspondent pas exactement à la même notion de "qualité de l'orge".

A - UTILISATION DE L'ORGE EN MALTERIE-BRASSERIE

1 - Historique

Malterie et brasserie sont deux industries présentes dans le monde entier et étroitement associées. La bière, dont l'origine remonte à l'Antiquité, est en effet le résultat de la fermentation alcoolique d'un moût, issu du traitement d'un malt d'orge, dite de brasserie, amérisé par le houblon depuis le Moyen Âge, et dont l'extrait fermentescible est épuisé par une levure de culture pure. Autrefois, les deux activités, la malterie et la brasserie, étaient situées dans la même entreprise rurale ou urbaine, familiale, artisanale. C'est surtout au XX^e siècle que la malterie industrielle prit son expansion et son indépendance tout comme la brasserie. La malterie française est devenue progressivement le **premier exportateur de malt dans le monde** après la deuxième guerre mondiale.

2 - La malterie

2.1 - Examen élémentaire des procédés

Cette première étape, essentielle à la fabrication de la bière, se déroule dans des usines spécialisées, les malteries. Elle consiste à transformer de l'orge, céréale dure, en une matière friable à l'arôme agréable et spécifique.

Le maltage a en effet pour but :

- de développer la biosynthèse des hydrolases du grain (endo- β -glucanase, α -amylase, β -amylase, peptidase)
- de fragiliser les parois des cellules de l'albumen et de favoriser l'attaque des constituants de réserve, qui sont dégradés en molécules de faible poids moléculaire,
- d'induire une dégradation des protéines en polypeptides et acides aminés

Le maltage comporte trois phases: le **trempage**, la **germination**, le **séchage**.

L'orge de brasserie, récoltée sèche (13-15 % d'humidité) ou séchée artificiellement et lentement (pays nordiques ou maritimes), subit tout d'abord l'opération de trempage (ou mouillage) qui porte son humidité de 13-15 % à 43-45 % en deux jours environ, selon la température de l'eau de trempage. Les grains sont alternativement immergés et retirés de l'eau. Outre l'humidification, cette phase assure un lavage des grains.

Lorsque la teneur en eau est suffisante, l'augmentation de la teneur en hormones de germination, notamment des gibbérélines, stimule la synthèse des enzymes. Dès ce moment, l'orge devient apte à subir une germination contrôlée en salle de germination ou va s'opérer, grâce à l'eau d'imbibition, une "désagrégation" des divers substrats biochimiques par des enzymes et la présence de phytohormones, d'oxygène et de CO₂. L'orge, au départ très dure, devient friable, riche en enzymes, en extrait fermentescible (saccharose, glucose et surtout maltose), que l'on traduit par la notion de rendement en extrait hydrosoluble.

Les hydrolases synthétisées (amylases et protéases) vont commencer à dégrader les granules d'amidon et les protéines, libérant des sucres simples et des composés azotés. Un minimum d'aération est alors nécessaire pour que les enzymes respiratoires oxydent les sucres et fournissent l'énergie nécessaire à l'activité de germination.

A ce stade, le "malt vert", va subir des opérations de séchage et de traitement à haute température (touraillage) s'accompagnant de transformations biochimiques, enzymatiques et non enzymatiques (réactions de Maillard) conférant au malt (puis au moût), sa couleur, son arôme, sa composition glucidique et protéiques, éléments très importants pour le brasseur.

Après dégermage, le malt est stocké en silos à la malterie puis à la brasserie, après un transport en sacs, en containers, en vrac (par voie fluviale, routière ou maritime).

2.2 - L'utilisation mondiale du malt, l'évolution des malteries en France et en Europe

L'utilisation du malt est évidemment liée à l'histoire de la consommation de la bière dans le monde.

L'analyse de la production de bière et de l'utilisation moyenne mondiale de malt met en évidence une relative stabilité malgré les nombreuses crises économiques avec, pour l'Europe, l'incidence de la Première Guerre mondiale (1914-18) puis de la Seconde (1939-45). Le "décollage" correspond sensiblement aux 30 dernières années, marquées par l'expansion de la démographie et de l'industrialisation, et de l'élévation du niveau de vie, dans les pays de l'OCDE comme dans les pays en voie de développement.

Afin d'approfondir cette évolution, nous allons prendre le cas de la France et, en particulier, suivre non seulement la mutation des malteries industrielles mais aussi le déclin des malteries intégrées aux brasseries avec: destructions systématiques durant 14-18 dans la région Nord, Picardie, Ardennes, très riches en entreprises, puis, reconstruction après 1920, enfin non-reprise de malteries intégrées après 1945.

La production de bière est devenue relativement stable en France depuis 1965 environ. Aussi le marché intérieur du malt français s'est trouvé limité. C'est alors que les malteries industrielles de notre pays, par la qualité, la création, la productivité des usines, ont fait progresser leur tonnage de malt vers l'exportation : CEE, Afrique, Amérique du Sud, Asie. Le pourcentage du malt français qui est exporté est ainsi passé de 27% (1962) à 55% (1970), à 71 % (1980) et à 80 % (1990).

Il est également intéressant de comparer l'évolution de la structure de l'industrie de la malterie dans 5 pays de la CEE entre 1964 et 1984.

2.3 - Évolution des matériels et des techniques

Tout d'abord, la capacité des malteries est passée de 0.5 à 2.0 T d'orge par jour mise en trempage au siècle dernier à 20 T en 1920, puis 60 T jusqu'en 1960, puis très vite à 150-200 T/jour. On a construit des malteries de 300 T/jour et plus, mais, en Europe, l'expérience a montré que vers 150-200 T/jour on obtenait de meilleurs résultats pour les malts classiques.

Le matériel de trempage a également évolué: cuves métalliques cylindro-coniques en remplacement des cuves à section rectangulaire (pierre, ardoise, bois, ciment). Ces cuves sont à fond perforé afin de pouvoir opérer les séquences de trempage et d'évacuation du CO₂. Dans les années 1960, les différentes opérations de la trempage furent programmées et télécommandées, afin d'éviter l'anaérobiose et accélérer la vitesse de trempage. Enfin sont venues les malteries en tour avec des cases superposées à 2 fonctions (trempage + germination). On a également climatisé la salle de trempage afin de stabiliser les paramètres de cette opération quelle que soit la saison. Après 1970, on a également été obligé de régler les questions d'économie d'eau et celle des eaux résiduaires de trempage.

Avant la trempage, afin de l'accélérer, l'abrasion de l'orge ou son laminage, ont été parfois utilisés.

Toutes ces évolutions ont été retenues d'après des essais en laboratoire (dormance, sensibilité à l'eau, énergie germinative, micromaltage) sur l'orge, en modifiant tous les paramètres possibles, ainsi qu'après des essais industriels en début de chaque campagne.

3 - La brasserie

3.1 - Examen élémentaire des procédés

L'industrie de la brasserie, selon les pays, va prendre peu à peu son indépendance vis à vis de la malterie au cours des XIX^e et XX^e siècles. Son industrialisation commence très tôt en Grande Bretagne (1784) puis en Europe continentale et en Amérique grâce aux multiples découvertes techniques puis scientifiques (mécanique, machines-outils, vapeur, électricité, froid industriel, microbiologie,...). L'industrie brassicole se modifiera profondément dans le monde, mais c'est une industrie d'une grande complexité, faisant appel à de multiples disciplines scientifiques et techniques.

Ceci s'explique par l'utilisation de plusieurs matières premières: malt, malts spéciaux, grains crus amyliacés (maïs, riz, blé, orge), saccharose, eau de fabrication, houblon, levure. Les procédés utilisés sont également très divers: transformations enzymatiques multiréactionnelles, transformations physicochimiques du moût bouillant et stérile obtenu (refroidissement, séparation du trouble, oxygénation, ensemencement par le levain) suivies par la fermentation alcoolique (alcool + CO₂), formation de produits secondaires (substances volatiles diverses en particulier), tout cela dans des conditions d'hygiène industrielle rigoureuse quels que soient les volumes de moût mis en fabrication. Il faut notamment gouverner le plus possible les métabolismes mis en jeu par le couple levure/moût.

Le **brassage** est la technique de préparation du moût de bière. Dans la brasserie traditionnelle, il n'était fait usage que de malt broyé, d'eau pure et de houblon. Cette règle, dite "de pureté", est encore provisoirement en vigueur en Allemagne. Généralement, d'autres éléments sont ajoutés au cours du brassage, soit pour diminuer le prix de revient, soit pour ajuster et optimiser la composition du moût de bière.

Pour respecter la législation, tous les produits ajoutés en brasserie doivent être issus de céréales. Ce sont des grains broyés, ou des sirops de sucre obtenus par hydrolyse enzymatique de l'amidon de maïs. L'apport de houblon contribue à donner l'amertume et renforce les différentes saveurs de la bière. Actuellement, il est possible d'ajouter des extraits purifiés de houblon, lorsque la législation le permet.

Les différentes étapes du brassage sont les suivantes

a) Le malt additionné d'eau forme une pâte (ou **maïsche**, ou "salade") à laquelle sont ajoutés des grains crus ou des farines liquéfiées ou des sucres. Un chauffage progressif (avec des paliers à 50, 63 et 75° C) permet d'obtenir le **moût**. Le but est d'optimiser l'action des enzymes du malt; de transformer totalement l'amidon en sucres (glucose, maltose, dextrines); d'hydrolyser partiellement les matières azotées pour les transformer en peptides et en acides aminés.

C'est au cours du brassage que l'apport de céréales broyées non maltées est réalisé. La température est progressivement portée à 40° C à l'ébullition de manière à assurer la gélatinisation et la liquéfaction de l'amidon. Les céréales ainsi traitées sont ensuite incorporées au brassin de manière progressive pour maintenir une température de l'ordre de 65 à 75° C.

b) La filtration permet d'obtenir un moût clair et de séparer la drêche destinée à l'alimentation animale.

c) Le houblonnage et la cuisson consistent en une ébullition d'environ 2 heures, au cours de laquelle on ajoute du houblon et/ou de ses dérivés. Le pH est ajusté à 5.2. L'opération permet de stériliser et de colorer le moût, d'inactiver ses enzymes, d'isomériser les substances amères du houblon et d'éliminer une partie des huiles essentielles du houblon. Cependant, il se produit une coagulation de certaines protéines colloïdales instables, par réaction avec les tanins du malt et du houblon, et le moût est trouble: c'est la "cassure".

d) La filtration et la préparation du moût permettent alors d'éliminer les enveloppes du houblon et la "cassure", à le refroidir et à oxygéner le moût pour permettre la multiplication de la levure. Le moût est alorsensemencé avec un levain pur (culture pure de levure).

e) La fermentation: Elle se poursuit de cinq à sept jours et est arrêtée avant que tous les sucres ne soient consommés. Pour les bières anglaises, belges et hollandaises, on emploie la fermentation "haute" (entre 15 et 25° C) avec une souche de *Saccharomyces cerevisiae* ; pour les autres bières, la fermentation "basse" (entre 7 et 11° C) avec une souche de *Saccharomyces uvarum*.

f) La garde: C'est une fermentation secondaire lente (deux à trois semaines), à l'abri de l'air, sous pression et à basse température (0, -1° C). Les sucres fermentescibles sont alors consommés, la préparation se trouve saturée en CO₂ (mousse et pétilllement apparaissent); des produits secondaires apparaissent, tels que des alcools supérieurs et des esters (maturation organoleptique); les colloïdes protéo-tanniques sont précipités et les levures décantées.

g) Filtration: Elle se pratique à travers une terre filtrante (Kieselguhr), afin d'éliminer les levures restantes et de supprimer le trouble.

h) Pasteurisation: Le produit est stabilisé par flash-pasteurisation (par exemple 70-72° C° pendant 30

secondes).

i) Soutirage et conditionnement: Ils se pratiquent à l'abri de l'air et sous pression (soutirage isobariométrique) pour conserver le CO₂ dissous. L'usine "conditionnement, emballage, manutention" est devenue aujourd'hui extrêmement importante. Elle est très sera gourmande en matériels, en crédits d'investissement et en occupation des sols.

Naturellement, à partir de ce schéma de fabrication, un grand nombre de procédés existent, aboutissant à des types de bières très différents.

Quantitativement, l'objet principal du brassage est la production de sucres fermentescibles par hydrolyse de l'amidon. L'action conjuguée des α - et β -amylases sur les deux composants de l'amidon, amylose et amylopectine, libère: du glucose (9.1 g/l), du maltose (52.4 g/l), du maltotriose (12.8 g/l), du maltotétraose (2.6 g/l) et des dextrines (21.3 g/l). Le pourcentage de sucres fermentescibles est d'environ 75 %. Les potentialités d'hydrolyse sont limitées par le pH, qui est voisin de 5.4, et qui ne peut être optimum à la fois pour l' α -amylase, la β -amylase et les enzymes débranchants du malt. Le taux de sucres fermentescibles obtenus dépend de la température de brassage. Il varie de 78 % à 60° C à 72 % à 69° C. De plus, en fonction du type de bière recherchée, le brasseur souhaitera conserver plus ou moins de dextrines, facteur qui joue un rôle important dans la qualité organoleptique du produit. Outre l'action principale des amylases, d'autres actions enzymatiques se poursuivront durant le brassage. Les protéases et les β -glucanases agissent notamment en début de brassage, lorsque la température n'est pas trop élevée.

3.2 - Fermentation haute et fermentation basse

Deux conduites de fermentation sont le plus souvent adoptées:

- la fermentation haute
- la fermentation basse

Quelle que soit la technique employée, l'industrie brassicole pratique le levurage. Les souches de levure ont été sélectionnées vis à vis de critères technologiques (température optimale de fermentation, capacité à floculer) et organoleptiques (faible production de diacétyl, etc.). Les levures sont ajoutées de manière à démarrer les fermentations avec environ $10 \cdot 10^6$ cellules / ml. Elles proviennent, dans un premier temps, de cultures pures préalables et de levains et souvent de levures récupérées en fin de fermentation. Le nombre de recyclages est limité (5 à 10 le plus souvent) pour éviter l'accumulation progressive de souches contaminantes.

a) La fermentation basse.

Elle est caractérisée par une température de fermentation comprise entre 5 et 10° C. Les souches utilisées, bien que considérées aujourd'hui comme des *Saccharomyces cerevisiae*, correspondent dans tous les cas à l'espèce *Saccharomyces uvarum*. Elles diffèrent des autres *Saccharomyces cerevisiae* par quelques caractères biochimiques et notamment la fermentation totale du raffinose.

La fermentation est lente à cause de la température (plusieurs semaines). En fin de fermentation, les cellules ont largement sédimenté ou floculé. Ce phénomène est lié d'une part aux caractéristiques de la souche et d'autre part à la température finale de fermentation, souvent abaissée à 4° C pour accentuer la floculation. Les levures sont récupérées pour réensemencement dans les dépôts. La couche de surface est

souvent retirée avant les traitements ultérieurs. La bière subit ensuite une maturation lente en cuve de garde à basse température. La fermentation basse est associée dans l'esprit du public aux bières blondes.

b) La fermentation haute

Dans les fermentations hautes, la souche utilisée appartient à l'espèce *Saccharomyces cerevisiae*. La fermentation est développée à 15-16° C avec une augmentation de température jusqu'à 20° C. Ces fermentations sont rapides. La bière produite est souvent commercialisée très rapidement après la fermentation. Le recyclage des levures est utilisé ici en utilisant la mousse accumulée en surface. Les cellules sont lavées et stockées le plus souvent au froid (4° C) avant réutilisation.

La bière fermentée (ou bière verte) est alors débarrassée de la levure et des substances organiques indésirables par une filtration clarifiante, parfois stérilisante sous pression (à cause du taux de saturation de la bière en CO₂, environ 5 g/l) et dans des conditions de stérilité industrielle.

3.3 - Qu'est ce que la bière ?

Brune, blonde, forte, belge, anglaise,... la bière fait partie à la fois de la biotechnologie "de papa" et des secteurs de recherches actifs.

La définition de la bière a été précisée par le décret du 28 juillet 1908. C'est une boisson obtenue par la fermentation alcoolique d'un moût fabriqué avec de l'eau, du houblon et du malt d'orge. Celui-ci est pur ou associé pour 30 % au plus de son poids à des succédanés ou "grains crus" (c'est-à-dire des céréales non maltées: semoule ou amidon de maïs, brisures de riz, orge, farine de blé) riches en amidon, ou à des sucres (glucose, saccharose,...), ou à des colorants (caramel, laurier, cerise, framboise...) dans certains pays étrangers

. A noter qu'en Afrique, on fabrique aussi du malt de sorgho ou de maïs, mais à l'échelle artisanale.

On trouve plusieurs catégories ou types de bière:

La législation française classe ainsi les bières en fonction de la densité primitive du moût avant fermentation:

- bière de table : 2 à 2.2° Régie
- bock : 3.3 à 3.9° Régie
- bière de luxe : 4.9 à 7.5° Régie
- bière pauvre en alcool : 2 à 3° Régie, mais moins de 1° Gay-Lussac

Si l'on tient compte des procédés de fabrication qui déterminent leurs caractéristiques organoleptiques, on peut également définir différentes catégories ou types de bières:

- Blondes "Pils" (Allemagne, France): malts clairs, maïsche diluée, bières légères (4 à 5° GL). Fermentation principale: 6-12 jours à 8 à 11° C. Souche: *Saccharomyces uvarum*. Fermentation secondaire (garde): de 1 mois (Kronenbourg) à 3 mois (bière de garde du Nord) à 0-2° C.
- Super "Pils" (Allemagne, France): Plus alcoolisées (6° GL). Mêmes procédés mais souches différentes. Plus aromatisées.
- Rousses (Nord, Angleterre, Ecosse: Georges Killian). Malt plus coloré (colorants: sirops de glucose ou

caramel). Une seule fermentation (haute) de 10 à 15 jours. Bières fortes (7° GL), plus gazeuse (grosses bulles) avec une mousse très blanche.

- Brunes (Angleterre, Irlande). Grande variété selon les types de houblon et de malt, le plus souvent grillé (Scotch-Porter), parfois torréfié (stout comme la Guinness). Très alcoolisées (8-9° GL).

- Spéciales. Avec levures en dépôt (pas de filtration finale). Deux fermentations. Fortes en alcool (10, 11, 12° GL).

- Gueuse ou Lambic (Belgique) Une fermentation à l'air libre et garde avec ferments lactiques et autres.ensemencement naturel. Malt de blé.

- Kriek (Belgique). Colorée et aromatisée à la cerise.

On parle aussi parfois de bières "de haute" et de bières "de basse". Les premières ont en général un goût plus prononcé (commercialisation très limitée); les secondes sont en général moins aromatiques mais de diffusion mondiale.

3.4 - La brasserie dans le monde, en France. La concentration industrielle

La brasserie a été une industrie évolutive, par sauts progressifs, mais freinée par des législations strictes dans chaque pays, législations souvent paralysantes pour l'entreprise mais nécessaires pour que les Etats perçoivent leurs taxes, précisent des réglementations dans la production, plus que par un souci réel de la qualité de la bière qui est laissée aux soins du brasseur.

Pour l'Europe occidentale, tout ceci va se concrétiser dans une concentration industrielle qui a commencé au début du XIX^e siècle et qui se poursuit jusqu'à nos jours à des rythmes variés selon les pays. Les deux guerres mondiales et les multiples crises économiques vont toucher très sérieusement la France et la Belgique. Au cours du XX^e siècle, à côté d'une augmentation de la production de 13 à 20 millions d'hl, le nombre de brasseries va ainsi passer de 3000 à 49, la production moyenne par usine passant alors de 5000 hl à plus de 400 000 hl.

4 - Comment peut-on définir la qualité brassicole d'une orge ? Quelles sont les bases biochimiques, génétiques ou physiologiques de cette qualité ?

En France, comme près de 80 % des malts produits sont actuellement importés, il est primordial pour le malteur de tenir compte des exigences de ses clients français et étrangers en ce qui concerne les caractéristiques du malt produit.

Certaines caractéristiques des orges influent sur la nature des malts et la qualité des bières.

4.1 - Principaux critères de qualité brassicole d'une orge

- La **pureté variétale** ("un malt de qualité = un malt de variété"). Un malt de qualité doit être homogène, il doit donc être constitué de grains tous au même stade de modification ce qui n'est possible qu'en travaillant sur un lot de variété pure. D'autre part, la présence, par exemple, d'une seule graine de tournesol

pour 1000 grains d'orge perturbe considérablement la fabrication du malt.

- La **variété** d'orge. Toutes les variétés n'ont naturellement pas la même aptitude au maltage. La Chambre Syndicale de la Malterie publie ainsi chaque année une liste de variétés préférées. Il est important de pouvoir identifier avec certitude la variété des lots d'orge au niveau des transactions commerciales.

- Un **calibre** élevé. Il répond en fait à une exigence physique: plus le grain est gros et rond, plus il contient d'amidon et moins sa teneur en enveloppes et en protéines est élevée.

- La rapidité de pénétration de l'eau et la rapidité de germination (faible **dormance** du grain).

- La richesse en "**extrait**" hydrosoluble. Cet extrait détermine le rendement au maltage, la fraction du malt qui va passer dans le moût et constituer les substrats de fermentation pendant le brassage.

- La teneur en **protéines**. Indispensables à la nourriture des levures (après hydrolyse en acides aminés), les protéines ne doivent surtout pas être présentes en quantité trop élevée car elles perturberaient la plupart des étapes de la brasserie. La norme est fixée à 11.5 % pour les orges de printemps et 12 % pour les orges d'hiver (cf 5.2 ci-dessous).

- La "**qualité**" des **protéines**. C'est une question fort complexe et toujours controversée. A teneur en protéine égale, il est possible que certaines catégories de protéines ne jouent pas un rôle aussi négatif que d'autres. Ainsi, comme on le verra ci-dessous, il est vraisemblable que des protéines solubles ou peu agrégées ne constituent pas une gêne à la migration rapide de l'eau dans le grain. Inversement, certaines hordéines très agrégatives (B-hordéines) ou très hydrophobes (C-hordéines) contribuent à limiter l'attaque des granules d'amidon par les amylases ou à freiner l'imbibition du grain, d'où une plus faible vitesse de désagrégation au cours du maltage.

- Un **pouvoir diastasique** élevé. C'est la capacité de transformer l'amidon en sucres simples fermentescibles. Les bières peuvent être fabriquées à partir de malt pur (100 % malt d'orge) - c'était l'exigence allemande jusqu'à maintenant - mais on peut y ajouter de l'amidon d'autres céréales comme le maïs. Les orges d'hiver présentent un pouvoir diastasique plus élevé que les orges de printemps. Lorsque l'on introduit de l'amidon extérieur au malt d'orge, il est donc préférable d'utiliser des malts de variétés d'hiver. Les Américains, par exemple, sont très friands du malt de Pleasant. (Il est à noter que les utilisateurs lointains (Afrique, Asie, Amérique du Sud) demandent des malts très riches en α -amylases car ils ajoutent très souvent des taux importants de grains crus de provenance locale)

- La **couleur**. La température à laquelle on portera l'orge en fin de maltage (séchage et touraillage) influe considérablement sur la couleur de la bière (qui peut passer de très jaune à très ambré et à très brun), mais la variété d'orge joue également un rôle sur cette caractéristique.

4.2 - Bases biochimiques, génétiques ou physiologiques de la qualité brassicole

4.2.1 - Composition des différentes matières premières

a) Le malt

Par la richesse de sa composition, le malt d'orge constitue un élément essentiel dans la fabrication de la bière. Il contient en effet de l'amidon et des sucres fermentescibles, des enzymes (capables de digérer l'amidon), des matières colorantes et des éléments de flaveur (qui peuvent aussi jouer le rôle

d'antioxydants), des tanins (qui servent à précipiter les protéines), des acides aminés (utiles à la nutrition des levures), des polypeptides (moelleux et mousse de la bière), enfin, des sels minéraux (jouant un rôle dans la fermentation et la qualité organoleptique de la bière).

Le principal substrat glucidique est l'**amidon**: 63-65 % du grain d'orge et 58-60 % du malt. Son attaque par l' α -amylase, son hydrolyse maîtrisée au stade de la germination, conduit en grande partie à la freinte de respiration qui sera bien surveillée au germe car il va falloir améliorer l'extrait, mais paradoxalement le rendement au maltage en même temps.

La microscopie à balayage a mis en évidence la présence de micro et de macrogranules d'amidon. Le pourcentage de microgranules peut fortement varier en fonction des facteurs agro-climatiques. Or ces microgranules sont difficiles à désagréger et ils peuvent contribuer au colmatage des filtres au brassage.

Il existe également des polysaccharides non-amidon, comme les gommages, les β -glucanes, hémicelluloses et cellulose, constituants des parois cellulaires de l'albumen, de la couche à aleurone et des enveloppes. **β -glucanes** et hémicelluloses ont été très étudiés car ils peuvent également créer des ennuis en ralentissant l'action des enzymes au cours de du maltage.

A noter que les β -glucanes, qui constituent environ les 2/3 de la substance des parois cellulaires de l'albumen, subissent une diminution de 86 % au cours du maltage. Pour expliquer cela, il nous faut mener une discussion sur les changements structuraux importants qui interviennent pendant cette phase de maltage.

Les **protéines**, constituants quantitativement minoritaires du malt (9 à 12 %), jouent également un rôle considérable. La composition protéique et l'effet de cette composition sur les différentes étapes de la transformation est détaillé ci dessous (5.2.3).

Les **enzymes** susceptibles de dégrader ces divers constituants ont été naturellement très étudiées. C'est le cas des α - et β -amylases, qui hydrolysent l'amidon, les β -glucanases qui hydrolysent les β -glucanes et jouent sur la rapidité de désagrégation. C'est également le cas des protéases, peptidases et de nombreuses autres enzymes (phosphatases, oxydases, etc.)

On ne peut enfin passer sous silence les lipides, les vitamines, les oligo-éléments, les matières minérales, dont le rôle est très sensible en brasserie.

b) L'eau de fabrication: matière première essentielle

Parfois légèrement alcaline pour le trempage (pour améliorer l'extraction des matières premières des enveloppes); en général presque totalement décarbonatée et reconditionnée de telle façon qu'elle soit pauvre en sels minéraux pour la fermentation (risque d'inhibition des levures).

c) Le houblon

Sa composition moyenne est la suivante (en % de matière sèche)

- 17 % de protéines totales (N x 6.25)
- 14 % de cellulose
- 10-11 % d'eau
- 3 % de polyphénols
- 18-20 % de résines amères et d'huiles essentielles : terpénoïdes, acides α -, humulone, etc.)

d) La levure, les levains, la culture pure, le génie génétique

La levure est une matière première capitale en brasserie car d'elle, par la fermentation, dépend en grande partie l'arôme de la bière. Les souches de levure ont été sélectionnées vis à vis de critères technologiques (température optimale de fermentation, capacité à flocculer) et organoleptiques (faible production de diacétyl, etc.). Les levures sont ajoutées de manière à démarrer les fermentations avec environ $10 \cdot 10^6$ cellules / ml. Elles proviennent, dans un premier temps, de cultures pures préalables et de levains et souvent de levures récupérées en fin de fermentation. En "fermentation basse", les souches utilisées, bien que considérées aujourd'hui comme des *Saccharomyces cerevisiae*, correspondant dans tous les cas à l'espèce *Saccharomyces uvarum*. Elles diffèrent des autres *Saccharomyces cerevisiae* par quelques caractères biochimiques et notamment la fermentation totale du raffinose. En "fermentation haute", les souches utilisées appartiennent à l'espèce *Saccharomyces cerevisiae*.

Pasteur a grandement participé à la création de la microbiologie et a renforcé les notions d'asepsie et d'antisepsie dans les industries, à partir de travaux sur les levures de brasserie.

La période actuelle se caractérise par de nombreux travaux d'avant-garde de biochimie microbienne et de génie génétique. La possibilité de transférer dans les levures des gènes étrangers (caractère "tueur" permettant la destruction de souches sauvages d'infection, réduction de la production de diacétyl (constituant gênant dans la saveur de la bière), production d'amyloglucosidases ou de β -glucanases, etc.) va certainement modifier les techniques de brassage, la composition du moût, la fermentation, la filtration la saveur. L'ère du génie génétique est entrée en brasserie, mais elle est suivie avec prudence en raison de la complexité de la fabrication de la bière et des incidences commerciales. Des répercussions sur l'ingénierie, l'automation, la productivité peuvent être attendues, mais aussi sur la création de produits nouveaux.

4.2.2 - Biochimie des processus de malterie et de brasserie

Les levures dégradent les glucides végétaux en un mélange d'alcools et de substances odorantes. Dans les fruits, les glucides existent sous forme de petites molécules formées de deux ou trois unités glucoses; ces molécules peuvent être directement absorbées et utilisées par les levures qui les transforment en alcools. Mais, dans les céréales, les glucides sont des molécules de taille beaucoup plus élevée, des polymères insolubles qui doivent être convertis en molécules de taille suffisamment petite pour pouvoir être absorbées et métabolisées par la levure. Dans ce but, deux méthodes se sont développées, utilisant soit des enzymes provenant du grain, soit des enzymes étrangères. C'est sur la première solution que repose la fabrication de la bière, les enzymes étant formées dans le grain au cours du processus de maltage.

Le **maltage** correspond essentiellement aux premières étapes de la germination normale (développement d'un potentiel enzymatique qui sera utilisé au cours de l'étape de brassage). Si l'on expose le grain à des conditions adéquates, en particulier d'humidité et de température, l'embryon produit des hormones qui migrent vers une couche externe du grain située sous le tégument. Là, ces hormones stimulent la formation de toute une série d'enzymes hydrolytiques qui, à leur tour, migrent entre les cellules de la partie centrale du grain, l'albumen, contenant les réserves, détruisent les parois cellulaires et attaquent l'amidon et les protéines. C'est à ce stade que les intérêts du malteur et du brasseur, et ceux du grain en train de germer, divergent. Si l'on laisse se poursuivre la germination, les petites molécules libérées par les enzymes hydrolytiques migrent de nouveau vers l'embryon et sont utilisées pour la croissance et la respiration. Pour le malteur, c'est du gaspillage. Il sèche donc le grain à température modérée de façon à abaisser son humidité de 40-50 % à 12 %. Cela suffit à arrêter les changements biochimiques de la germination, mais ne suffit pas pour le grain, ou "malt vert" demeure stable au stockage. Le malteur chauffe alors à 80-90° C le malt vert afin d'abaisser son humidité à 1-5 %. C'est le touraillage. Ce procédé

a pour résultats d'inactiver partiellement les enzymes, de renforcer la coloration par des produits résultant de réactions entre les glucides et acides aminés (réactions de Maillard), et de former des traces de produits qui peuvent peser sur la saveur de la future bière. Arriver à équilibrer le contenu enzymatique, la couleur et la saveur convenant à un type donné de bière, constitue un exercice qui met à l'épreuve le talent du malteur et dont la compréhension pose encore de gros problèmes aux biochimistes.

Grâce à une visualisation par la méthode de fluorescence au Calcofluor, on peut suivre aujourd'hui la dégradation des parois cellulaires de l'albumen pendant le maltage, démarrant du côté de l'extrémité scutellum/embryon du grain. On peut voir également dans ces coupes, avec l'aide de l'immunofluorescence, comment l' α -amylase diffuse vers les régions où les parois cellulaires ont été dégradées, c'est-à-dire dans la partie "modifiée" de l'albumen. On a observé que, chez des mutants d'orge à parois cellulaires fines, l'albumen se dégrade beaucoup plus rapidement, malgré des niveaux comparables de β -glucanase et d' α -amylase. L'épaisseur des parois cellulaires et la teneur en β -glucane sont donc les facteurs limitants de la dégradation de l'albumen. Toutefois, pour pouvoir attaquer les granules d'amidon entourés d'une matrice protéique dense, l' α -amylase doit agir en coopération avec de nombreuses enzymes, autres que la β -glucanase, telles que protéases et peptidases, qui vont contribuer à rendre les granules d'amidon accessibles. Un autre problème à considérer est la découverte dans les grains d'une série de protéines agissant comme inhibiteurs d'enzyme, telles que l'inhibiteur d' α -amylase-subtilisine ASI, lequel, toutefois, est dégradé pendant le brassage.

Traditionnellement, le malteur testait le niveau de modification du malt en comprimant le grain entre ses ongles. Aujourd'hui, on peut estimer cette modification de façon plus précise en utilisant un Malt Analyser au Calcofluor, ou Friabilimètre qui, par mouture, sépare les parties tendres (dégradées) des parties dures (non dégradées) du grain de malt. On peut également faire une mesure quantitative rapide par spectrophotométrie au Calcofluor des β -glucanes dans l'orge, le malt, le moût, la bière. On a déjà mentionné que les balles du grain d'orge sont une aide à la filtration du moût, cette filtration étant toutefois fortement dépendante de la viscosité du moût à laquelle contribuent significativement les β -glucanes de haut poids moléculaire. Les β -glucanes peuvent d'ailleurs persister dans le moût du fait que les β -glucanases sont très sensibles aux températures élevées. Ceci amène alors un allongement du temps de fabrication. Ainsi, les β -glucanes ont-ils une double importance technologique : résistance à la dégradation de l'albumen au cours du maltage et gêne à la filtration de moût et de la bière.

L'étape suivante est le **brassage** qui consiste à moudre le malt et à le mélanger avec de l'eau chaude. Dans ces conditions, les enzymes sont à nouveau activées et continuent à dégrader les polymères en petites molécules, sans avoir à sacrifier de matériel à la croissance de l'embryon qui, évidemment, a été détruit lors du touraillage. L'extrait aqueux (moût) est alors séparé des résidus de graines non dissous, appelés drêches (utilisés pour l'alimentation animale), et mis à bouillir avec du houblon. L'ébullition stérilise le moût, précipite les protéines non dégradées et convertit certains acides du houblon, les acides α - en substances extrêmement amères, les acides iso-a, qui confèrent à la bière son amertume caractéristique. Le moût est refroidi à la température convenant au type particulier de levure et de bière, aéré ou oxygéné, etensemencé avec une levure provenant d'une fermentation précédente. Il faut veiller soigneusement à conserver la pureté de la souche et éviter toute contamination microbiologique. La croissance et la reproduction de la levure se font en présence d'oxygène tant qu'il en reste dans le milieu. Le nombre et la masse des cellules augmentent considérablement au cours de cette étape, mais sans produire beaucoup d'éthanol. Lorsque tout l'oxygène a été utilisé, les cellules de levure s'adaptent à la vie sans oxygène, et produisent alors de l'éthanol ainsi que toute une série de produits qui ont une forte influence sur la saveur de la future bière.

Après séparation de la levure, la "bière verte" (verte se rapportant à sa jeunesse et non à sa couleur) est refroidie; on la laisse reposer le temps nécessaire à la séparation des substances qui la rendent trouble

(provenant de l'interaction de protéines et peptides résiduels solubles avec les polyphénols des téguments des grains et du houblon) et à l'équilibrage des divers composants de saveur (un peu comme la saveur d'un vin s'équilibre après mûrissement). La bière est alors filtrée ou centrifugée avant d'être conditionnée et distribuée.

4.2.3 - Stabilité colloïdale et mousse de la bière

a) Stabilité colloïdale:

La bière, brillante après filtration, mise au froid vers 0° C, ou surpasteurisée, ou oxydée, peut donner un voile, d'abord un trouble au froid réversible par réchauffement, ou bien permanent à la suite de chocs thermiques anormaux ou durables (stockage, transports), constituant une gêne considérable sur le plan commercial. La vente croissante à longue distance, la vente en pays chauds, la diffusion des réfrigérateurs, ont obligé la brasserie à se préoccuper du traitement de la bière afin d'éviter ces troubles, le consommateur exigeant des bières brillantes, quelle que soient les conditions de leur transport et de leur stockage.

Deux questions se sont alors posées: qu'est ce que le trouble colloïdal (réversible ou permanent de la bière, quelle est sa composition chimique ? Comment l'éviter ?

Grâce aux nouvelles techniques d'analyses biochimiques, il a été montré que le trouble colloïdal de la bière est pour 60 % environ composé de dérivés protéiques de 10 à 60 kDa, le reste étant des polyphénols et des traces de métaux lourds (Cu^{++} , Fe^{++}). Il est probable que ce soit le couplage oxydatif des polyphénols avec les protéines qui soit à l'origine du trouble. Malheureusement, bien que de nombreux travaux aient cherché à élucider le déterminisme de ce trouble, on est encore loin d'avoir compris le rôle respectif des protéines (un résidu élevé de protéines dans la bière ne conduit pas systématiquement à un trouble) et des polyphénols ou de leurs précurseurs. Des méthodes physiques ou chimiques de prédiction du trouble ont été développées. On a cependant peu de moyens de l'éviter. Il faudrait pour cela détruire les polyphénols au cours du brassage en utilisant les polyphénoloxydases naturelles du malt. Une fois oxydés, les polyphénols complexés aux protéines pourraient être éliminés, mais cela présenterait le risque d'augmenter considérablement la couleur du moût.

b) La mousse de la bière:

C'est également un problème important, surtout dans la vente des bières basses dont la présentation dans le verre transparent du consommateur doit suivre des règles "esthétiques" précises : mousse fine et abondante, nourrie par des petites bulles de CO_2 , mousse la plus stable possible dans le temps, collant sur la paroi du verre, et ceci à une température variable selon les pays.

Les techniques d'analyse de filtration sur membrane sélective, de gel-filtration, de chromatographie sur gel, d'HPLC, ainsi que d'électrofocalisation ont été utilisées ces dernières années dans l'étude des fractions azotées, très complexes de la mousse.

On sait aujourd'hui que la composition chimique de la mousse comprend des polypeptides dont certains hydrophobes de 10 à 30 kDa, et jusqu'à 90 kDa, accompagnés de glucides (β -glucanes, dextrines) et, sans doute, de glycoprotéines. Les dérivés des acides α - (isohumulones) se retrouvent dans la "bière de mousse", très amère au goût. Ces dérivés du houblon améliorent le "collant" et ce fait se traduit dans la technique de houblonnage au brassage.

Des traces de métaux lourds (Fe, Co, Ni, Cu) favorisent également la stabilité de la mousse d'une bière houblonnée. La tension superficielle et la viscosité de la bière interviennent également. Il existe, par ailleurs, une action néfaste des dérivés lipidiques sur la tenue de la mousse (lipides du gritz de maïs, air comprimé mal épuré, mauvais rinçage des verres, etc.).

5 - Traduction de la demande qualitative de l'industrie ou du consommateur en termes d'objectifs de sélection et de production de variétés d'orge brassicole

5.1 - Historique de la sélection des variétés d'orge

On a vu que l'orge avait été utilisée dans la fabrication de la bière dès l'Antiquité notamment en raison de sa richesse en amidon, en β -amylase native, et aussi parce que c'est une céréale à grains vêtus, les enveloppes permettant de protéger l'embryon au cours de la germination et de faciliter les filtrations.

Les orges (à 2 rangs de printemps, à 2 ou 6 rangs d'hiver), ont été cultivées, non seulement dans tout le Bassin méditerranéen, mais leur expansion s'est poursuivie dans les régions tempérées et même nordiques lors de l'extension des civilisations agricoles. L'homme a appris très tôt les hybridations, mais il n'y avait alors que des "populations" plus ou moins homogènes sur le plan génétique. Après les travaux de MENDEL en 1865 et de VILMORIN (1850-1882), ds stations de recherche se sont créées pour subvenir aux besoins spécifiques du malteur et du brasseur, qui sont: l'homogénéité variétale, la richesse en extrait et en amidon, en hydrolases, une teneur moyenne en protéines, le bon calibrage, la pénétration rapide de l'eau à la trempe, la germination rapide (énergie germinative). Citons, par exemple, pour l'Europe, les stations de Svalov (S), de Cambridge et de Rothamsted (UK), de Freising-Weihenstephan (D), et de la Secobra en France.

Ces stations ont pu disposer de moyens fins et fiables de détermination botanique et sont parvenues peu à peu à comprendre l'importance des deux notions fondamentales de **génotype** (somme de l'information génétique des gènes) et de **phénotype** (ensemble des caractères structurels et fonctionnels dépendant de l'interaction génotype x milieu).

Les moyens principaux de détermination botanique qui furent mis au point (et qui sont toujours utilisés dans la sélection des orges de brasserie) sont les baguettes et nervures, et les lodicules. Plus récemment, la détermination de la variété et de la pureté variétale de l'orge a été possible au moyen de l'électrophorèse de la fraction protéique alcoolo-soluble (hordéine). La méthode a pu être étendue au malt lui-même (Autran et Scriban, 1979; Montembault et coll. 1983), avec d'importantes incidences sur les contrats d'achat et les cahiers des charges joints pour les malteurs et les brasseurs.

La malterie et la brasserie ont dépendu non seulement de ces travaux scientifiques et agronomiques, mais aussi du développement rapide de l'agriculture céréalière en France, des concertations au sein des stations entre généticiens, agriculteurs, malteurs et brasseurs. En 1947 fut créée l'European Brewery Convention (EBC) toujours en pleine activité, dont le "Barley Committee" continue de publier les résultats des champs d'essais sur les variétés brassicoles adaptées, selon les latitudes, les climats, par rapport à des témoins. Les orges sont soumises à des analyses conventionnelles et sont même micromaltées, tous les résultats analytiques étant maintenant exploités par l'informatique.

De nombreuses recherches (Scriban 1977, 1980; Berbigier et Jestin, 1981) ont montré l'importance des caractères phénotypiques sur les qualités technologiques des orges de brasserie. Il en découle une politique chez les sélectionneurs, pour les contrats de culture selon les régions privilégiées et les achats d'orge.

Les méthodes génétiques modernes employées en sélection de l'orge sont essentiellement, soit l'androgénèse dans laquelle, après traitement à la colchicine, on obtient une lignée haploïde doublée, soit les croisements interspécifiques avec des espèces sauvages (*Hordeum bulbosum*). Par contre, les manipulations de gènes n'en sont qu'à leurs débuts dans le cas de l'orge de brasserie.

En résumé, des orges à 2 rangs de la fin du XIX^e siècle, des orges à 6 rangs (escourgeons) venant en France du Nord, en Vendée, en Auvergne, aux variétés actuelles de la CEE, les différences de qualité, de rendement, de comportement au maltage sont considérables et ont amené à modifier les installations, les procédés, et à favoriser la productivité des malteries.

5.2 - Quels tests de sélection utiliser ?

La sélection d'orges de type brassicole constitue un cas de figure particulièrement difficile. On a vu à quel point la technologie de la malterie-brasserie est complexe. On a vu la multiplicité des critères de qualité. En outre, on observe chez l'orge une influence considérable (beaucoup plus que dans le cas des blés) des facteurs agro-climatiques sur l'expression de la qualité brassicole. Il est donc très difficile de définir chez l'orge une notion de "qualité brassicole intrinsèque" des génotypes. Il existe naturellement des variétés d'orge recommandées par l'industrie. Mais il ne s'agit souvent que d'une indication, la caractère brassicole ou non d'un lot d'orge étant réexaminé chaque année, seulement après examen des échantillons récoltés.

Comment traduire alors en termes de microtests simples les spécifications du malteur et du brasseur ? Quels constituants de base faut-il introduire dans le grain (par croisement et sélection classique - ou plus tard par manipulation génétique) pour satisfaire ces spécifications ?

Deux approches peuvent être signalées :

- L'utilisation de tests classiques permettant d'apprécier la valeur brassicole (simultanément à une sélection pour le rendement et la valeur agronomique), ces tests pouvant être élémentaires (mais ils seront alors multiples compte tenu du nombre de paramètres de la qualité à prendre en compte) ou globaux (micromaltage, microbrassage, par exemple). Dans ce dernier cas, seule une application en fin de sélection est concevable compte tenu du coût des tests, ce qui ne peut que limiter le progrès génétique.

- L'utilisation de microtests biochimiques ou moléculaires, mettant en jeu des constituants jouant un rôle fonctionnel dans l'expression de la qualité brassicole: hordéïnes, protéases, amylases, glucanases, et leurs inhibiteurs.

5.2.1 - Prédiction de la qualité brassicole au moyen de tests classiques.

Un certain nombre de tests simples ont été et sont encore couramment utilisés :

- Détermination du poids de 1000 grains
- Calibrage (> 2.5 mm)
- Teneur en protéines totales
- Extrait hydrosoluble sur orge broyée "Extrait de Nancy"
- Test physiologique de Weihestephan (prise d'eau en 48 h et 72 h)
- Test de sensibilité à l'eau
- Activités amylasiques
- Test de sédimentation SDS (test de Zeleny modifié)

Précisons qu'au niveau de l'inscription des variétés d'orges au Catalogue Officiel français, 3 tests simples sont pratiqués: calibrage, teneur en protéines, taux d'extrait, auxquels s'ajoute, dans le cas de variétés présentant le potentiel brassicole le plus intéressant, le test de micromaltage.

5.2.2 - Prédiction de la qualité brassicole au moyen de tests biochimiques ou moléculaires

D'une façon générale, l'explication complète des phénomènes fondamentaux qui ont lieu au cours des transformations technologiques repose sur certains constituants biochimiques. Il est clair qu'on maîtrisera d'autant mieux les problèmes de qualité (notamment en sélection variétale) qu'on aura mieux su les expliquer en termes de composition biochimique ou de structure.

Les avantages des tests biochimiques sont bien connus:

- Ils sont praticables en grandes séries et souvent à faible coût sur des micro quantités de grains: on peut donc les utiliser pour un criblage rapide des lignées à des stades très précoces de la sélection,
- L'information qu'ils donnent est souvent liée au génotype (et peu influencée par les facteurs d'environnement) : cette information est donc précieuse pour le sélectionneur puisqu'elle va théoriquement permettre de d'approcher la composante de la qualité qui revient au seul génotype (valeur potentielle du génotype),
- Ils peuvent porter sur des molécules spécifiques, jouant un rôle direct, fonctionnel, dans l'expression de la qualité.

Ces dernières années, la tendance a donc été de remplacer les anciennes méthodes d'analyse globales et souvent empiriques par des outils modernes fondés sur la composition moléculaire des produits.

5.2.3 - Intérêt particulier des recherches sur les protéines de l'orge et du malt

Dans le grain d'orge, les cellules de l'albumen contiennent des granules d'amidon insérés dans une matrice protéique constituée principalement d'hordéines (protéines de réserve) et de glutélines (protéines de structure), constituants plus ou moins agrégés et résistant donc plus ou moins à la dégradation.

Au cours du maltage, des protéases commencent à dégrader la matrice protéique :

Au cours du brassage, on assiste :

- a) A une solubilisation des petites molécules (acides aminés, peptides, polypeptides) qui passent ainsi dans le moût, tandis que les agrégats non dégradés sont mal solubilisés et sont retenus lors de la première filtration.
- b) A une poursuite de la dégradation des polypeptides en peptides et en acides aminés, constituants qui interviennent sur la qualité du produit fini aux différents niveaux suivants :

- **acides aminés**

---> nourriture de la levure

---> rôle sur les produits volatils fabriqués et excrétés (goût de la bière)

---> réactions de Maillard avec les glucides ---> couleur du moût et de la bière

- **peptides** (dont des glycopeptides et leurs complexes avec les dérivés du houblon)

---> rôle dans la formation et la stabilité de la mousse

- **polypeptides** (dont complexes avec les polyphénols)

---> précipité: trouble colloïdal de la bière

Cette chaîne d'évènements dans laquelle les protéines interviennent indique que l'équilibre a) au niveau de la teneur en protéines totales, b) de la répartition entre les différentes catégories de protéines de l'orge (protéines "solubles": albumines et globulines; protéines "insolubles": hordéines et glutélines) et, c) entre les différentes sous-fractions (A-, B-, C- et D-hordéines, par exemple), joue certainement un rôle fondamental dans l'expression de la qualité brassicole.

On peut faire l'hypothèse que, lors du maltage, une matrice protéique (qui entoure les granules d'amidon) constituée de protéines très agrégées soit plus difficile à attaquer et diminue ainsi l'accès des amylases à leur substrat amidon (particulièrement dans le cas des petits granules), d'où une désagrégation insuffisante du malt. Le même résultat serait à attendre si la matrice protéique possédait un caractère hydrophobe très marqué (avec dans ce cas une limitation de la pénétration de l'eau et des substances solubles lors des débuts de la germination). Au niveau du brassage, cela ne peut qu'entraîner un extrait trop faible, ainsi que des problèmes de filtration en raison de la présence dans la maïsche d'agrégats protéiques et de petits granules d'amidon mal dégradés. Un excès de polypeptides de taille élevée peut encore subsister dans le moût, d'où, en fin de chaîne, des problèmes de stabilité colloïdale ou de mousses indestructibles.

Corrélativement, cette dégradation insuffisante des protéines peut entraîner une déficience du moût en acides aminés et donc un manque de nourriture pour la levure, avec des déviations du métabolisme de celle-ci et apparition d'arômes anormaux, ainsi qu'une couleur insuffisante (peu de réactions de Maillard).

En dépit d'une présentation quelque peu schématique de tous ces processus, on peut donc imaginer que **le seul fait d'avoir une matrice protéique difficile à attaquer entraîne, non seulement une désagrégation insuffisante du malt, mais aussi toute une cascade de problèmes de fabrication.**

D'où l'importance des travaux visant à une meilleure compréhension de la structure et des propriétés physicochimiques des protéines du grain d'orge. Si l'hypothèse développée ci-dessus se confirmait, on pourrait en déduire que les différents problèmes de fabrication rencontrés avec des orges de qualité brassicole insuffisante ne sont pas aussi indépendants qu'on pouvait le penser: ils auraient une origine commune, l'attaque insuffisante de la matrice protéique.

Bien que l'aspect quantitatif global des protéines participe certainement à l'explication d'une désagrégation insuffisante, la nature et les propriétés des différentes catégories de protéines pourraient donc jouer un rôle important. On rappelle ainsi que les B- et les D-hordéines ont la propriété de s'accumuler dans le grain sous la forme d'agrégats de hauts poids moléculaires, difficiles à solubiliser et à attaquer, et que les C-hordéines ont, quant à elles, un caractère hydrophobe très marqué.

Dans le cadre de cette hypothèse, on dispose donc d'outils biochimiques permettant de prédire (au moins en partie) la qualité brassicole des orges en sélection:

- détermination du % respectif de B-, C- et D-hordéines par solubilité

- détermination du % de protéines très agrégées par SE-HPLC
- détermination de la teneur en "gel protéine" (négativement corrélée au % d'extrait en brasserie).

Par contre, les nombreuses techniques d'électrophorèse développées en vue de l'identification des variétés et des génotypes d'orge, ne constituent pas nécessairement des outils adaptés à ce problème. L'électrophorèse ne permet en effet de travailler que sur des protéines préalablement dissociées en monomères ou en "sous-unités". Dans le cas des B- ou des D-hordéines, l'électrophorèse n'est possible qu'après dissociation des liaisons intermoléculaires (β -mercaptoéthanol, SDS). Le diagramme obtenu dans ces conditions, s'il constitue bien une "empreinte digitale" de la variété, ne contient plus l'information touchant aux agrégats protéiques, à leur taille et à leur structure.

5.2.4 - Autres approches en cours d'étude

- Le dosage des activités α -amylasiques, β -amylasiques, β -glucanasiques peut également constituer un moyen de prédire une composante importante de la qualité brassicole. Toutefois, le résultat n'est vraiment utile au sélectionneur que s'il est bien représentatif du génotype considéré. Ainsi, dans le cas de l'activité β -glucanasique, une faible héritabilité a été observée, ce qui rend difficile la sélection sur ce caractère. Pour être efficace, elle doit être poursuivie au cours de plusieurs générations et dans différents milieux. En revanche, dans le cas des activités α -amylasique et β -amylasique, l'héritabilité est plus élevée (bien que l'interaction génotype x milieu soit plus élevée en ce qui concerne l'activité α -amylasique).

- Une voie plus performante pour sélectionner des génotypes d'orge ayant des caractéristiques particulières au niveau de ces différentes enzymes est le dosage immuno-chimique. L'obtention d'anticorps spécifiques contre la β -glucanase et l' α -amylase (couplés à des fluorochromes émettant à différentes longueurs d'onde) permettrait en outre un criblage en très grande série et automatisé des grains d'orge. Une approche semblable peut être imaginée pour sélectionner des types d'orge ayant une composition plus équilibrée en acides aminés grâce à des anticorps anti-hordéines.

- Une autre voie pourrait concerner également les inhibiteurs de ces différents systèmes enzymatiques. On peut en effet penser que les inhibiteurs notamment de protéases et d' α -amylases peuvent interférer avec la production d'acides aminés et de sucres simples due à l'action des enzymes. On connaît ainsi plusieurs protéines qui ont des effets d'inhibiteurs. La catégorie des CM-protéines de l'orge est ainsi actuellement étudiée en raison de son rôle, sous certaines conditions, d'inhibiteur de trypsine et d' α -amylase.

- Signalons enfin que le marquage de la qualité brassicole est aujourd'hui envisageable au moyen de sondes d'ADN, utilisables pour la technique de polymorphisme des fragments de restriction (RFLP)

5.3 - Orge d'hiver ou orge de printemps ?

408 000 ha en 1990 contre 850 000 en 1985. Les surfaces consacrées à l'orge de printemps continuent de dégringoler en France. Et pourtant, la production d'orge de printemps deux rangs sur le territoire français ne satisfait qu'un tiers des besoins des malteurs qui sont obligés d'avoir recours soit aux importations d'orges de printemps anglaises ou danoises, soit aux orges d'hiver six rangs voire deux rangs pour combler ce déficit. Les brasseurs préfèrent et de loin les orges de printemps en particulier les marchés européens avec des Kronenbourg ou des Heineken pour qui "tradition et qualité" sont synonymes d'orge de printemps.

Chez les malteurs, l'orge de printemps est également la plus appréciée car, contrairement aux orges

d'hiver, elle se réveille très rapidement après la récolte (elle lève rapidement sa dormance) et son rendement "malterie" est plus élevé.

Pourquoi les agriculteurs français continuent-ils à bouder les orges de printemps ?

Le prix de l'orge de printemps est certes attractif. Mais seulement 40 % de la collecte d'orge de printemps va effectivement vers la brasserie. Ce prix attractif ne s'applique donc qu'à une partie de la collecte, le reste étant déclassé au vu de la qualité de la récolte. La qualité et la maîtrise de la teneur en protéines restent le "talon d'Achille" de cette production. D'autre part, si les rendements ont beaucoup progressé (45 qx/ha de moyenne nationale en 1990, avec des parcelles de pointe à 60 ou 80 qx), il n'en reste pas moins vrai que les fluctuations de rendement chez les orges sont beaucoup plus élevées que chez les blés (55 % au lieu de 25 %), ce qui n'encourage pas l'agriculteur. Les agriculteurs français réussiront-ils à réapprovisionner ce marché des orges de brasserie ? Les malteurs n'ont pas l'air d'y croire. En dehors de structures coopératives (Chevalier-Martin, Malteurop) qui relancent la production auprès de leurs propres adhérents, d'autres groupes malteurs investissent non plus sur les lieux de production de l'orge mais dans les grands ports, donc pour s'approvisionner sur le marché international.

Comment concilier le revenu de l'agriculteur (qui dépend essentiellement du rendement de la culture) et la production de lots d'orges adaptés aux exigences de la malterie-brasserie. La question est d'autant plus complexe qu'un niveau élevé de fumure azotée (indispensable à l'élaboration d'un rendement en grains élevé) peut se répercuter sur la teneur en protéines laquelle ne doit pas dépasser 11.5 %.

5.4 - Peut-on cultiver des orges de productivité élevée et satisfaisant les besoins de la malterie-brasserie ?

Comment cultiver des orges de productivité élevée et satisfaisant à la malterie-brasserie ?

Un équilibre entre rendement et qualité est à trouver. Il n'existe apparemment pas de recette miracle. On peut cependant définir les 6 points de passage nécessaires à l'obtention d'une production d'orge de qualité brassicole.

a) Le choix des variétés

Le choix des variétés. Il est défini par la Chambre Syndicale de la Malterie Française. Une liste de variétés adaptées à chaque région est proposée aux agriculteurs.

Trois conditions doivent être réunies: l'intérêt économique de l'agriculteur, l'adaptation de la variété aux débouchés de la malterie et l'homogénéité des lots. Triumph, Natasha, Volga, Prisma Pression et Maltine sont aujourd'hui les principales variétés retenues pour les orges de brasserie de printemps (plus de 50 % pour Triumph).

Il est nécessaire d'utiliser des semences certifiées, seul moyen d'obtenir des lots de variétés pures.

b) La date du semis

La date du semis: quelques règles sont à respecter. Trouver le bon moment pour semer le plus tôt possible, c'est-à-dire vers la mi-février, mais pas trop tôt car un gel tardif pourrait entraîner des dégâts importants,

soit sur les plantes, soit au moment de l'épiaison.

c) La densité du semis

La densité du semis: elle est effectuée en fonction des aléas agro-climatiques. Une fourchette de densité de 380-450 grains/m² doit être respectée.

d) La fertilisation

Actuellement, il est clair que la maîtrise de la fertilisation azotée des orges de brasserie reste très imparfaite. La solution passe nécessairement par une étude approfondie du métabolisme azoté et carboné de la plante. Le métabolisme de l'azote et du carbone sont dépendants, en particulier le lien entre la dégradation de la Rubisco et la remobilisation de l'azote. L'utilisation de l'azote des organes végétatifs nécessite la sénescence qui, ajoutée aux mécanismes de migration des assimilats, influence le rendement et la teneur en protéines. Deux voies sont alors possibles pour l'amélioration de la production d'orges de qualité brassicole satisfaisante:

- L'optimisation des pratiques culturales : On sait en effet qu'un apport azoté précoce augmente le rendement, tandis qu'un apport tardif augmente plutôt la teneur en protéines, l'appareil végétatif étant déjà en place.

- La voie génétique : A l'optimum de rendement, il existe des risques d'avoir un taux de protéines trop élevé. Il faut donc mieux cerner les facteurs génétiques et les mécanismes physiologiques influençant ces risques. Cela permettra la création de variétés mieux adaptées, gardant, par exemple, une faible teneur en azote, indépendamment de la fertilisation...).

En résumé, il faut apporter de l'azote, mais avec mesure. Il faut prendre en compte l'objectif de rendement de la parcelle et apprécier les possibilités en fourniture d'azote par le sol. La différence conditionne la dose d'azote à fournir. Il faut cependant toujours garder à l'esprit que tout excès est nuisible pour le rendement et pour la qualité. En effet, l'augmentation du risque de verse, la perte de calibre, la teneur en protéines élevée par l'excès d'azote pèsent lourd sur le prix payé.

Quant à la méthode d'apport, un seul apport suffit au semis ou dans les quelques jours qui suivent. Le fractionnement est souhaité dans un sol filtrant et en période très pluvieuse (avec un apport minimum de 30 unités) (3/4 au semis, 1/4 au stade tallage) en proscrivant à tout prix un apport tardif.

e) La protection des cultures

f) La pleine maturité des orges

L'orge de brasserie doit avoir atteint sa pleine maturité avant d'être récoltée, sinon des ennuis d'hétérogénéité et de désagrégation interviennent au maltage. Une erreur de 2 ou 3 jours à la moisson a une influence considérable sur la qualité du malt obtenu. Le test habituellement utilisé est l'humidité du grain, la norme étant de 15 % maximum, sinon il faut sécher. L'énergie germinative à 5 jours doit être correcte (> à 98 %).

B - Quelques utilisations de l'orge en alimentation humaine

1 - Mouture de l'orge

La mouture de l'orge est réalisée pour obtenir des produits du type: orge perlée, gruaux d'orge, flocons ("flakes") d'orge et farine d'orge, pour la consommation humaine. Comme les enveloppes du grain d'orge sont très indigestes et ne sont pas souhaitables dans de tels produits, elles sont systématiquement éliminées au début du procédé de mouture (décorticage, dépelliculage).

La séquence des opérations de mouture de l'orge se présente alors de la façon suivante:

Orge perlée:

- Nettoyage
- Conditionnement
- Décorticage ou dépelliculage
- Elimination des enveloppes par aspiration
- Calibrage
- Broyage grossier (pour les gruaux d'orge)
- Usinage, perlage
- Polissage

Flocons d'orge:

- Mouillage des gruaux d'orge
- Cuisson à la vapeur
- Floconnage sur cylindres
- Séchage à l'air chaud

Farine d'orge:

- Mouture sur cylindres des orges préalablement perlées

Cette dernière opération s'effectue avec un rendement d'environ 82 % à partir de l'orge perlée. Cette dernière représentant seulement 58 % du grain initial, le taux d'extraction de la farine d'orge n'est donc que de 42 %.

Une farine d'orge contient en moyenne 10.2 % de protéines, 1.7 % de lipides, 1.2 % de matières minérales, 0.7 % de cellulose, 76.9 % de glucides et donne 364 calories pour 100 g.

2 - Liqueurs à base d'orge

Le whisky est obtenu par distillation d'un moût fermenté de grains de céréales et est laissé vieillir en futs de 2 à 12 ans avant d'être consommé.

La Scotch whisky "pur malt" est fabriqué uniquement à partir d'orge maltée, tandis que les autres whiskys sont obtenus à partir de mélanges d'orge maltée et de grains d'autres céréales, maltés ou non maltés: maïs (bourbon), seigle (rye whisky), blé, ou avoine.

Certains gins (Pays-Bas) sont également distillés à partir d'un mash contenant au moins un tiers d'orge.

C - Utilisation de l'orge en l'alimentation animale

Les caractéristiques généralement requises pour une orge fourragère sont : une teneur en protéines élevée et une teneur en lysine élevée.

La sélection de types d'orge riches en lysine a ainsi constitué pendant longtemps une préoccupation importante de la sélection, ayant amené la création de différents mutants. Ainsi, parmi les variétés créées au Danemark, le Risø 1508 a une teneur des protéines en lysine élevée et stable (4.8-5.2) au lieu de 3.5-4.0 g/16 g N dans l'orge normale. Un objectif de départ était d'atteindre pour de tels mutants un rendement agronomique élevé. Cet objectif a été pratiquement atteint grâce à une sélection intensive pour la qualité du grain et le rendement en utilisant le caractère (pléiotropique) de gros germe du M 1508 sans passer par une analyse chimique. Les lignées ainsi améliorées (Piggy) par croisements (par exemple par Triumph) possèdent des teneurs en amidon plus élevées que M 1508. Mais, d'une façon générale, les orges riches en lysine telles que M 1508 tendent à avoir de plus faibles teneurs en amidon et en énergie disponible. L'accroissement des lipides équilibre le déficit en amidon chez ces lignées améliorées, résultant en une énergie de combustion de 18.5 kJ/g au lieu de 18.1 (Triumph).

Des essais nutritionnels ont montré que la teneur en protéines optimale pour une orge riche en lysine sont de 12-13 %. A cette teneur, les performances nutritionnelles équivalent à celles d'un mélange : orge normale + protéines complémentaires ayant 15 % de protéines. Il est donc inutile d'employer des fertilisations azotées très élevées (pour amener à 15 % le taux de protéines de l'orge), cela permettant en outre de réduire de 20 % environ le niveau de la pollution.

On peut toutefois considérer qu'actuellement, une orge fourragère (par exemple pour l'alimentation des porcs) doit avant tout donner une production de viande efficace avec un rapport viande/matières grasses acceptable, mais ceci en association avec des compléments protéiques (tourteau de soja). En Europe Occidentale, l'énergie (amidon) est donc en fait économiquement limitante car des protéines bon marché sont importées des USA sous la forme de tourteaux de soja. L'énergie disponible dans l'orge constitue donc le caractère qu'il faudrait avant tout sélectionner. Cela pourrait signifier qu'une orge de brasserie à grains gros, ventru, riche en amidon soit le type idéal, à la fois pour la malterie-brasserie et pour l'alimentation animale. Par ailleurs, l'emploi d'orges nues à des fins d'alimentation animale pourrait être considéré si des variétés nues à haut rendement pouvaient être créées.

Rappelons que les méthodes officielles d'évaluation de l'orge incluent le dosage des protéines (Kjeldahl, infra-rouge) mais n'incluent généralement pas de dosage de l'amidon. Dans certains essais toutefois (Danemark) le NIR a été utilisé pour le dosage de l'amidon, de même qu'une méthode d'hydrolyse rapide pour évaluer la variation de l'amidon. Pour plus de certitude dans l'évaluation (au niveau de l'inscription officielle), il conviendrait de s'assurer que tout accroissement du rendement d'une nouvelle variété est bien dû aux nutriments réellement utiles (amidon, protéines) et non aux enveloppes ou aux hémicelluloses.

| |
|----------------------|
| BIBLIOGRAPHIE |
|----------------------|

- BRIGGS D.E. - 1978. Barley. Chapman and Hall, London, 612 p.
- CARANTINO S. - 1983. Pour comprendre la bière. Biofutur, 9, 59-61.
- DALGLIESH C. - 1980. La biochimie de la bière. La Recherche, 110, 434-443.
- FIELD J.M., SHEWRY P.R. and MIFLIN B.J. - 1983. Aggregation states of alcohol-soluble storage proteins of barley, rye, wheat and maize. J. Sci. Food Agric., 34 (4), 362-370.
- GODON B. - 1991. Biotransformation des produits céréaliers. Ed. APRIA/INRA, Technique et documentation, Lavoisier, Paris, pp. 170-174.
- HALCROW I. - 1990. Protein modification and its measurement throughout the malting process. programme. Proc. Conv. - Inst. Brew. (Aust. N. Z. Sect.) 21st, 94-99.
- HASELMORE R.M., TUNNICLIFFE C.G., PEIPI M.G. and SLACK C.R. - 1990. Using wort β -glucan levels to aid selection in a barley breeding programme. Proc. Conv. - Inst. Brew. (Aust. N. Z. Sect.) 21st, 79-82.
- HOSENEY R.C. - 1986. Malting and Brewing. In: Principles of Cereal Science and Technology (R.C. HOSENEY, Ed.), AACC, St Paul, MN, USA, Chapter 9, pp. 185-202.
- JACK P.L. - 1990. Application of DNA probes (RFLPs) in barley breeding. Monogr. -Eur. Brew. Conv., 15 (E.B.C. Symp. Plant Biotechnol. 1989), 130-136.
- LASZTITY R. - 1984. The chemistry of cereal proteins. CRC Press, Boca Raton, USA, 203p.
- LAZZERI P., JAEHNE A., FRETZ A. and LOERZ H. - 1990. Genetic transformation and protoplast culture of barley. Monogr. -Eur. Brew. Conv., 15 (E.B.C. Symp. Plant Biotechnol., 1989), 4-15.
- MIFLIN B.J., FIELD J.M. and SHEWRY P.R. - 1983. Cereal storage proteins and their effect on technological properties. "In: Seed Proteins", Phytochemical Society of Europe Symposia, Series n° 20 (J. DAUSSANT, J. MOSSE and J. VAUGHAN, Eds.), Acad. Press, 12, 255-319.
- MONTEBAULT A., AUTRAN J.C., JOUDRIER P. and MOLL M. - 1983. Varietal identification of barley and malt. J. Inst. of Brewing, 89 (4), 299-303.
- MUNCK L. - 1987. Quality of beer. In: Cereal Science and Technology, Proceedings from 23. Nordic Cereal Congress, (L. MUNCK, Ed.), Copenhagen, pp. 61-78.
- PALMER G.H. and BATHGATE G.N. - 1976. Malting and brewing. In "Advances in Cereal Science and Technology" (Y. POMERANZ, Ed.) American Association of Cereal Chemists, St Paul, Minn., USA, Vol. 1, pp. 237-324.
- POMERANZ Y. - 1987. Barley. In : Modern Cereal Science and Technology (Y. POMERANZ, Ed.), VCH, Weinheim, RFA, Chapter 18, pp. 419-440.

- RIVOIRE P. - 1990. Déterminisme physiologique et génétique de la protéogenèse en vue de la sélection d'orges de qualité. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 157 p.
- SCRIBAN R. - 1988. Les industries agricoles et alimentaires. Progrès des sciences et techniques. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, 382 p.
- SCRIBAN R., BERBIGIER A., JESTIN L. and DENIS J.B. - 1981. Etude de quelques caractères agronomiques et technologiques chez des variétés d'orge de printemps. *Agronomie*, 1 (2), 143-155.
- SKERRITT J.H. - 1991. Applications of ELISA technology in cereal genetic screening, production and processing. In: *Advanced Biotechnologies in Agriculture* (L. CHICCHI, Ed.), Agrobiotec, Bologna, Italy, pp. 16-41.
- TRAGOONRUNG S., HAYES P.M. and BROICH S.L. - 1990. Near-infrared reflectance estimates of grain protein and malt extract in hill and row plot evaluations of spring malting barley. *Can. J. Plant Sci.*, 70 (1), 71-78.