

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

BC.04/12

Université de Jijel

Faculté des Sciences Exactes et Sciences
de la Nature et de La vie

Département de Biologie Moléculaire
et Cellulaire



جامعة جيجل

كلية العلوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة

قسم البيولوجيا الجزيئية والخلوية

01
01

*Mémoire De Fin D'études Pour L'obtention Du Diplôme
Des Etudes Supérieures en Biologie*

Option : Biochimie

Intitulé

*Les tests d'appréciation de la qualité de blé, utilisation du
L'électrophorèse dans la caractérisation et l'identification
génétique des protéines de réserve*

Présenté devant le jury:

Examineur : Derai. E

Encadreur : Abbes. A



Présenté par

Sabba Sabrina

Lalfi Radia



Année Universitaire : 2011- 2012

Remerciements

Nous remercions Dieu qui nous a donné le courage et la volonté d'avoir réussi dans nos études.

Nous remercions nos parents, pour tout leur amour, leur encouragement, et leur soutien.

Notre encadreur: M^{me} : Abbes Arbia qui nous a encadrés et surtout par ses conseils, ses encouragements et ses connaissances.

Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et juger ce modeste travail.

Nos vifs remerciements vont à tous les enseignants qui nous ont suivis durant nos années d'études.

À tous nos collègues de la promotion 2012.

Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire

Sabrina
Radia



Liste des abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation.

CIC: Comité International des Céréales.

CM : centimorgans.

Da: Dalton

FAO: Food Agriculture Organisation.

FPM: Faible Poids Moléculaire.

g: gramme.

Gli: Gliadine.

Glu: Gluténine.

HPM: Haut Poids Moléculaire.

KDa: Kilo Dalton

Kg: Kilo gramme.

Mg: Milligramme.

Mm: Millimètre.

Mt: Million de tonne.

pH : Potentiel Hydrogénique.

PS: Poids Spécifique.

SDS : Sodium dodécyl sulfate

SG-FPM : sous-unités gluténines de faible poids moléculaire.

SG-HPM : sous-unités gluténines de haut poids moléculaire.

Liste des figures

Figure N° 1 : Fleurs et graine (caryopse) de blé.....	4
Figure N° 2 : Origine du blé tendre.....	5
Figure N° 3 : coupe d'un grain de blé.....	6
Figure N° 4 : Structure du grain de blé.....	7
Figure N° 5 : Structure de l'amylose et de l'amylopectine.....	8
Figure N° 6 : Organisation des différentes prolamines du gluten.....	10
Figure N° 7 : Formation du réseau élastique du gluten.....	11
Figure N° 8 : : Model « train and loop ».....	11
Figure N° 9 : Le pétrissage assure la cohésion des protéines de blé (à gauche), le gluten forme un réseau élastique (à droite).....	12
Figure N° 10 : Model de Ewart ; association linéaire et aléatoire des prolamines	12
Figure N° 11 : Filière de transformation du blé.....	13
Figure N° 12 : Diagramme de mouture.....	15
Figure N° 13 : Structure moléculaire de l'amidon.....	17
Figure N° 14 : Structure moléculaire de la cellulose.....	28
Figure N° 15 : Les paramètres technologiques de panification du blé.....	25
Figure N° 16 : Classification des protéines de réserve du blé.....	27
Figure N° 17 : Le gluten : sans les propriétés, uniques dans le règne végétal, de viscoélasticité de ses protéines, la panification n'aurait pas été possible.....	28
Figure N° 18 : Polymorphisme des gliadines et gluténines (SG-HPM et SG-FPM) de quelques variétés de blé tendre.....	29
Figure N° 19 : structure consensus de la région codante des gènes de gluténines à FPM.....	31
Figure N° 20 : la structure consensus de la région codante des gènes de gluténines à HPM d'après SHEWRY et <i>al</i> , 1995.....	31
Figure N° 21 : Liaisons disulfures détectées dans le gluten.....	32
Figure N° 22 : Carte de la totalité des loci des gluténines et des gliadines (connus chez le blé tendre et le blé dur), sur le chromosome B du groupe 1.....	33
Figure N° 23 : Nomenclature des bandes et des allèles des SG-HPM.....	34
Figure N° 24 : Un réseau glutineux insuffisamment viscoélastique et/ou une pâte trop collante aboutissent généralement à l'inaptitude du blé à la panification.....	36
Figure N° 25 : Diagrammes des SG-HPM et SG-FPM révélés par la technique SDS-PAGE de quelques cultivars de blé tendre.....	37
Figure N° 26 : extraction des glutenines et gliadine selon la procédure de Singh et <i>al</i> , 1991...38	

Liste des tableaux

Tableau N° 1 : Projections FAO 2015 – 2030 de la production mondiale de blé par régions géographiques.....	3
Tableau N° 2 : Composition du blé en divers éléments (en % de la matière sèche).....	8
Tableau N° 3 : Différents types de farines de blé et de seigle en fonction du taux de cendres.....	16
Tableau N° 4 : Critères de qualité du blé tendre.....	22
Tableau N° 5 : Différentes classes des protéines du grain du blé.....	27
Tableau N° 6 : principaux allèles des SG- HPM et des oméga gliadines ayant un effet favorable sur les caractéristiques rhéologiques de la pâte.....	36

SOMMAIRE

Introduction.....	1
-------------------	---

Chapitre I : Blé et qualité

I. les céréales.....	2
I.1 Situation du Blé au niveau mondial.....	2
I.1.1 Les prévisions de la FAO.....	2
I.2 Le blé.....	3
I.2.1. Aperçu historique.....	3
I.2.2 Description de la plante:.....	3
I.2.3 Nombre de chromosomes.....	4
I.2.4 Structure génomique.....	5
I.2.5 Le blé, description et caractéristiques.....	5
I.2.5.1 Les différents tissus du grain.....	5
I.2.6 Eléments de botanique et morphologie.....	6
I.2.7 Composition des différents tissus du blé.....	7
I.2.8 Composition du grain de blé.....	8
I.2.8.1 Les glucides.....	8
I.2.8.2 Les protides.....	9
➤ Les globulines.....	9
➤ Le gluten.....	9
➤ Les gliadines.....	10
➤ Les gluténines.....	10
I.2.8.3 Les lipides.....	13
I.2.8.4 Les minéraux.....	13
I.2.8.5 Les vitamines.....	13
I.2.9 Transformation du blé.....	13
I.2.9.1 Diagramme général de mouture.....	14
I.2.9.2 Caractéristiques des farines.....	15
➤ Le taux d'extraction.....	15
➤ Le taux de blutage.....	16
➤ Le taux de cendres.....	16
I.2.10 Rhéologie de la pâte à pain. Influence des constituants de la farine.....	16
1.2.10.1 Glucides.....	16
➤ L'amidon.....	16
➤ Sucres simples.....	17
➤ Cellulose et pentosanes.....	17
➤ Fibres.....	18
1.2.10.2 Protéines.....	18

1.2.10.3 L'eau.....	19
1.2.10.4 Lipides.....	19
1.2.10.5 Vitamine.....	19
1.2.10.6 Minéraux.....	19
1.2.10.7 Enzymes.....	20
I.2.11 Débouchés.....	20
a. La panification.....	20
b. Autres usages que la panification courante.....	20
c. Utilisation non alimentaire.....	21
1.2.12 Qualité du blé.....	21
I.2.12.1 Qu'est-ce qu'un blé de qualité ?.....	22
I.2.12.2 Facteurs biochimiques et génétique influençant la qualité des blés.....	22
I.2.12.3 Tests d'appréciation de la qualité.....	22
➤ Les mesures physiques.....	22
➤ Les mesures globales.....	23
1. L'électrophorèse des protéines.....	23
2. Le test de machinabilité.....	23
3. Le test de panification.....	23
➤ Les mesures indirectes.....	23
1. Temps de chute d'Hagberg : (activité amylolytique).....	23
2. Test de sédimentation de Zeleny-Norme AFNOR NF V-03-704.....	24
3. Alvéographe de Chopin.....	24

Chapitre II : Déterminisme génétique des protéines de réserves

II.1 Classification des protéines de réserve du blé.....	26
II.2 Protéines de réserve.....	28
II.2.1 Les gliadines.....	29
II.2.2 Les gluténines.....	30
II.2.2.1 Les sous unités de gluténines à faible poids moléculaire (FPM).....	30
II.2.2.2 Les sous-unités de gluténines haut poids moléculaire (HPM).....	31
II.3 Fonctionnalité des protéines du gluten et leurs interactions dans la pâte en développement.....	32
II.3.1 Déterminisme génétique des protéines de réserve.....	33
II.3.2 Relation entre composition en SG-HPM et qualité.....	34
II.3.3 Influence de la diversité des protéines de réserve sur la qualité de la pâte.....	35
II.3.4 La prédiction de la qualité boulangère.....	36
II.4 Utilisation de l'Electrophorèse des protéines de réserve en amélioration des plantes.....	36
II.4.1 L'identification variétale.....	37
II.4.2 Etudes de la diversité génétique.....	37
II.5 Extraction et séparation des protéines de réserve.....	37

II.6. Electrophorèse des protéines de réserve.....	39
Conclusion.....	40
Références bibliographiques.....	41

Introduction générale

Les produits céréaliers sont le plus souvent évalués en termes de texture et de composition biochimique globale. Lorsqu'il s'agit de contrôler leurs propriétés nutritionnelles, de modifier leur formule, pour des besoins économiques ou de santé, les technologues ont étudié des mécanismes qui modulent la structure de ces produits.

Le blé est la principale ressource alimentaire de l'humanité: il assure 15 % de ses besoins énergétique. (FEILLET, 2000) .le grain de blé est écrasé afin de faire éclater l'enveloppe et de libérer la farine.

La farine est constituée de plusieurs éléments. Selon les quantités (ratio) de chacun, elles seront destinées soit à la biscuiterie, la pâtisserie ou la panification. La valeur boulangère d'une farine est en relation avec la quantité et la qualité des protéines du gluten, et des aptitudes fermentatives de la pâte qui dépendent surtout de son pouvoir diastasique et de sa richesse en sucrose. De même, plusieurs des constituants de la farine ont une influence directe ou indirecte sur la couleur et la rhéologie des pâtes à pain (MATZ, 1991).

Le gluten est le produit d'une opération technologique. Il est isolé par lixiviation ou centrifugation de pâtes malaxées. Les pourcentages de gliadines et gluténines peuvent en outre être facilement déterminés grâce à leur insolubilité dans l'eau : elles peuvent donc être facilement séparées des autres éléments formant la pâte. En outre la gliadine est soluble dans l'alcool et la gluténine est soluble dans une solution alcaline. Le rôle de ces protéines dans la fabrication du pain est essentiel. Elles contribuent à former un complexe caractéristique qui donne l'élasticité et la résistance à la pâte à pain lors de sa fabrication (BERGER, 1983 ; CORNEC, 1994; BEROT, 1996 ; MOSINIAK, 2002).

Parmi les protéines de réserve du blé, les gluténines sont les plus ingrates à étudier. Elles sont insolubles dans les tampons classiques et naturellement agrégées. Leur mise en solution passe par leur dénaturation à l'aide de détergents fortement ioniques (SDS), ou d'urée ou de guanidine et le plus souvent la réduction partielle des liaisons disulfures inter-covalentes à l'origine de leur caractère polymérique. Ces particularités expliquent le peu de travaux visant à leur caractérisation physico-chimique. Cependant un grand nombre des protocoles analytiques développés par les « Chimistes Céréalières » s'attachent au fractionnement et à la caractérisation des sous-unités gluténines, selon leur solubilité, leur taille, leur densité de charge ou leur hydrophobicité de surface. (MOREL, *et al*, 1996).

Les nombreux travaux conduits sur le polymorphisme des protéines du gluten et leur influence sur la valeur d'utilisation (MCRITCHIE *et al*, 1990) ont montré que leur diversité pouvait avoir une part importante dans l'explication des différences variétales de la qualité.

Dans ce qui suit on essaiera de dégager les composants du grain et les facteurs génétiques impliqués dans leur variabilité, qu'il est important de prendre en compte pour améliorer aujourd'hui la valeur d'utilisation du blé et caractériser les protéines constitutives du gluten qui jouent un rôle important dans l'expression de la qualité.

Une étude bibliographique succincte est donnée sur les protéines de réserve et le rôle des principaux constituants biochimiques du grain de blé au cours des processus technologiques.

Chapitre I

I. LES CEREALES

En botanique, les céréales appartiennent à la famille des graminées (blé, orge, avoine, seigle, riz, maïs, ...). Le blé, avec le maïs et l'orge, est une des céréales les plus employées. Il est du genre *Triticum*. Les botanistes distinguent le *Triticum aestivum* ou blé tendre, utilisé pour la panification dans l'alimentation des animaux et de l'homme ; les céréales représentent un intérêt majeur car elles assurent l'apport calorique principal (CHEFTEL, 1992). D'un point de vue économique, les céréales jouent un rôle important dans l'agriculture.

I.1 Situation du Blé au niveau mondial

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, le taux de croissance des rendements du Blé s'est brutalement accéléré, passant de moins de 0,5% à plus de 3% par an en moyenne. On passe ainsi de 15 à 70 quintaux par hectare en cinquante ans. Il faut aujourd'hui à peine une dizaine d'heures de travail pour cultiver et récolter 1 hectare de Blé, alors que cela en nécessitait une centaine en 1949 (MARSAL, 1999).

Ce formidable développement de l'agriculture de l'après-guerre résulte de la mise en œuvre d'une politique volontariste de modernisation et de dynamisation.

Le commerce international des céréales ne représente néanmoins qu'une partie plutôt modeste des échanges mondiaux - environ 30 à 40 milliards de dollars par an - soit moins de 1% de la valeur du commerce mondial de marchandises qui représente environ 500 milliards de dollars (TOUSSAIN, 1999). Sur une production mondiale de 600 Mt de Blé, les échanges de Blé représentent environ 100 Mt (CIC, 2006).

En effet, tous les pays s'efforcent de couvrir leurs besoins par leur propre production, et sont parfois limités par leur potentiel de production (contraintes agronomiques, climatiques...). Les exportations constituent néanmoins une partie non négligeable de la production.

I.1.1 Les prévisions de la FAO

Les projections FAO 2015-2030 de la production mondiale de blé par régions géographiques sont présentées dans le tableau 01, nous remarquons que dans les pays développés ; une augmentation de la production est bien importante par rapport aux pays en voie de développement, et ceci est due aux programmes de sélection et d'amélioration de la qualité des céréales produites.

Tableau N° 01. Projections FAO 2015 – 2030 de la production mondiale de blé par régions géographiques

Régions	1995/97 en millions de tonnes	1995/97 en %	2015 en millions de tonnes	2015 en %	2030 en millions de tonnes	2030 en %
Monde	580	100	748	100	858	100
Pays développés	308	53	392	52	440	51
Union européenne (15)	94	16	118	16	133	15
Autres pays européens	0,9	<1	1,2	<1	1,2	<1
Amérique du Nord	89	15	113	15	135	16
Ex-URSS	69	12	97	13	104	12
PECO + ex-Yougoslavie	32	5	39	5	41	5
Autres pays développés	23	4	24	3	25	3
Pays en voie de développement	272	47	356	48	418	49
Afrique subsaharienne	2,4	<1	4,6	1	6,9	1
Afrique du Nord / Proche Orient	50	9	63	8	72	8
Asie de l'Est	112	19	136	18	136	16
Asie du Centre	85	15	126	17	169	20
Amérique latine	22	4	27	4	33	4

I.2 Le blé

I.2.1. Aperçu historique

Les premières utilisations du Blé semblent se situer au début du néolithique, époque où le Blé 'sauvage' était récolté au Moyen-Orient dans des pays tels que les actuels Liban, Syrie et sud de la Turquie. Peu à peu, en raison de sa valeur nutritive, le Blé est devenu, dès 4000 ans avant J-C, une source alimentaire en Europe, Afrique du nord et Asie. Les grains étaient d'abord utilisés crus puis grillés. La pratique du grillage ou de la torréfaction améliore la conservation des grains par déshydratation, et donne certainement une saveur plus agréable car elle produit, par caramélisation, un goût plus doux.

L'innovation importante fut la cuisson proprement dite, rendue possible avec l'invention de la poterie. Il n'est pas encore question de pain, mais de bouillies et de galettes non levées. De nouvelles espèces de Blé ne cessent d'apparaître car les agriculteurs savent sélectionner les meilleurs grains pour les cultures des années suivantes. L'homme a ensuite appris à extraire le produit qui lui convenait, la farine, et à le transformer, en particulier en pain.

I.2.2. Description de la plante:

Les espèces de blé cultivées, quels que soient leurs niveaux de ploïdie, sont des plantes annuelles qui se reproduisent par autofécondation et qui possèdent une photosynthèse. Lors de la germination des graines, il y a production de racelles à partir de l'hypocotyle et de la première feuille à partir de l'épicotyle. Ensuite chaque plant développera, selon les variétés de blés, entre 6 et 25 tiges (chaumes) qui pousseront pendant la période de croissance végétative jusqu'à une hauteur maximale d'environ 1 m 70. Très rarement certaines variétés développent jusqu'à 60 chaumes. Les programmes d'amélioration modernes produisent maintenant, comme pour le riz, des variétés de haute productivité dites "semi-naines" qui atteignent environ 1 mètre de hauteur. La croissance de la plante est déterminée car la floraison est synchrone et produit un épi à l'apex

de chaque chaume fertile après une période de croissance végétative qui peut être aussi courte que 40 jours pour les variétés hâtives (Figure 1). L'épi est composé de 15 à 40 épillets dont les deux glumes enveloppent plusieurs fleurs (3 à 5 dépendant des variétés) dont certaines (1 à 3) avorteront avant la maturité. Chaque fleur hermaphrodite protégée par deux glumelles (palea et lemma), comprend un ovaire possédant un seul ovule, un stigmate divisé (bifide) plumeux et trois étamines (comprenant un filament et anthère). A la suite de l'autofécondation (cléistogamie) il y a formation d'un fruit indéhiscent, le caryopse. Le caryopse comprend plusieurs couches extérieures (l'exocarpe, le mésocarpe et l'endocarpe) qui proviennent du développement des parois de l'ovaire et de la graine proprement dite. La graine comprend une paroi (testa), une couche sous-jacente de cellules spécialisées (la couche d'aleurone), l'albumen (endosperme dans la terminologie anglaise), qui correspond environ 80 % du volume du fruit, où l'on retrouve l'amidon et le gluten (éléments de base pour la préparation des farines) et le germe (ou embryon) riche en huiles (Figure 1).(WEISER et *al*, 1990)

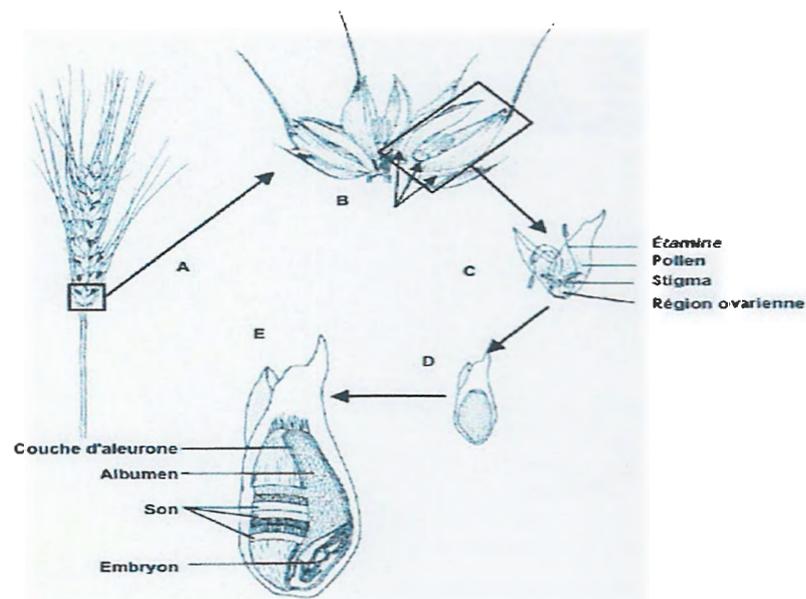


Figure N°1.Fleurs et graine (caryopse) de blé (WEISER et *al*, 1990)

A. Épi composé de plusieurs épillets possédant plusieurs fleurs. **B.** Épillet à trois fleurs. **C.** Composantes d'une fleur. **D.** Ovaire mature, ou jeune caryopse. **E.** Fruit mature (ou caryopse), entouré de bractées, disséqué pour montrer les différentes parties.

I.2.3 Nombre de chromosomes :

Selon une classification botanique basée sur le nombre de chromosomes que renferment les cellules végétatives du blé, on distingue trois catégories :

- les diploïdes ou engrains (*Triticum spontaneum*) à 14 chromosomes.
- Les tétraploïdes à 28 chromosomes parmi lesquels on trouve le *triticum durum* ou blé dur.
- Les hexaploïdes à 42 chromosomes dont fait partie le *Triticum aestivum* ou blé tendre, ce dernier aurait été obtenu par hybridation de trois graminées à 14 chromosomes (FOULD-SPRINGER, 1996).

I.2.4 Structure génomique

Des hybrides interspécifiques, entre les blés des différents groupes furent créés et l'analyse comparative de leur comportement méiotique (formation ou non de bivalents) amena (KIHARA, 1919 et 1924) (cité par GALLAIS et BANNEROT, 1992) et d'autres chercheurs à supposer l'origine allopolyploïde du blé tendre (figure 2) et à donner les formules génomiques suivantes :

- *Triticum aestivum*: AA BB DD
- *Triticum turgidum*: AA BB
- *Triticum monococcum* : AA

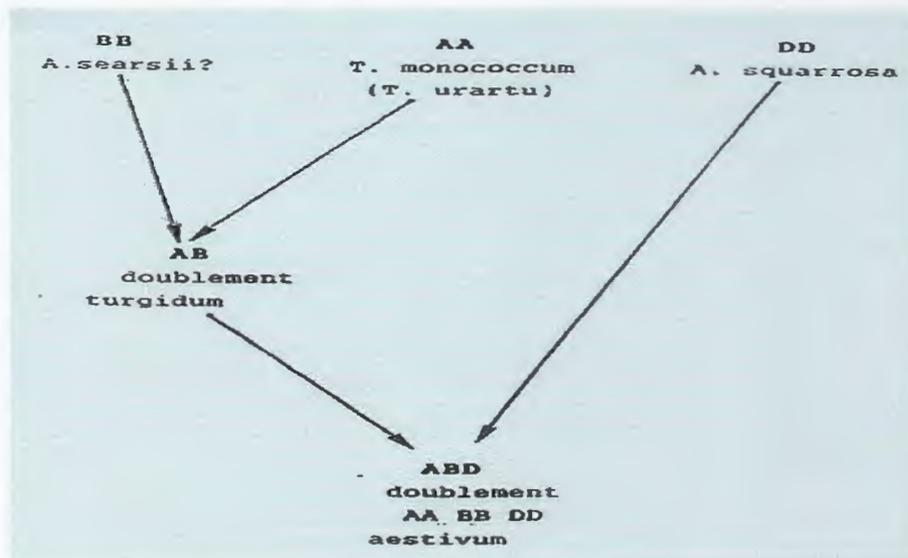


Figure N°2. Origine du blé tendre (GALLAIS et BANNEROT, 1992).

I.2.5 Le blé, description et caractéristiques

Actuellement, le blé est la céréale la plus produite et la plus consommée en Europe. Il existe aujourd'hui plus de 20 000 variétés de blé au niveau mondial, variétés adaptées à différents milieux, et développant une résistance envers certains pathogènes et maladies du blé. Au niveau mondial, la production de blé arrive en seconde place, après le maïs.

I.2.5.1 Les différents tissus du grain :

Le développement des tissus dans le grain de blé a été décrit par SIMMONDS et O'BRIEN (SIMMONDS et O'BRIEN, 1981) Avant la fécondation, l'ovule se compose du sac embryonnaire entouré par le nucelle et son épiderme. Lors de la fécondation, les deux noyaux haploïdes d'un grain de pollen entrent dans le sac embryonnaire et fusionnent, pour l'un avec le noyau de la cellule œuf et pour l'autre avec les deux noyaux polaires de la cellule centrale. Deux tissus, l'un diploïde, le zygote, l'autre triploïde, l'albumen, vont ainsi se développer. L'albumen est rapidement différencié en deux tissus, les cellules internes deviennent de grandes cellules contenant de l'amidon et des protéines et constituent l'albumen amylicé alors que les cellules externes donnent naissance à la couche à aleurone. La maturation des grains dure de 45 à 50 jours après la fécondation (SIMMONDS et O'BRIEN, 1981). (figure 3).

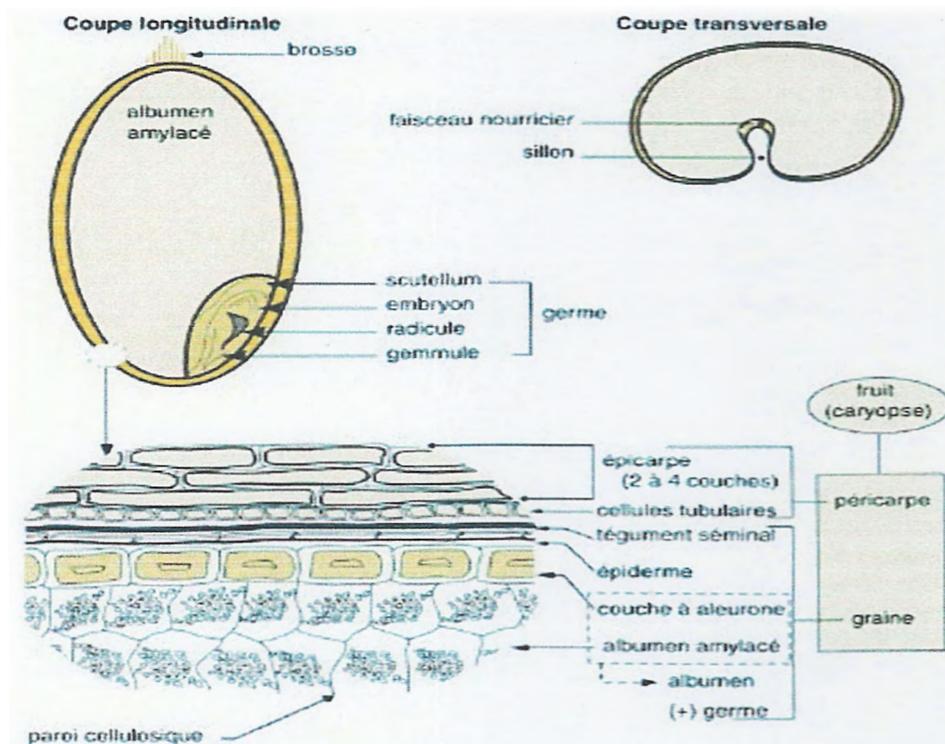


Figure №3. coupe d'un grain de blé, d'après (FEILLET, 2000)

I.2.6 Eléments de botanique et morphologie

Le blé est une plante herbacée monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la famille des graminées. Les deux espèces qui dominent sont le blé tendre et le blé dur. Ce fruit sec est constitué d'une graine unique intimement soudée à l'enveloppe du fruit qui la contient. Sur l'épi, le grain est entouré d'enveloppes qui n'adhèrent pas à la graine et qui sont éliminées au moment du battage. La structure du grain de blé est présentée dans la (figure 4).

D'un point de vue morphologique, le grain de blé a une forme ovoïde et présente sur la face ventrale un sillon qui s'étend sur toute la longueur. A la base dorsale du grain, se trouve le germe qui est surmonté par une brosse. Le grain de blé mesure entre 5 et 7 mm de long, et entre 2,5 et 3,5 mm d'épaisseur, pour un poids compris entre 20 et 50 mg. Le grain est constitué de différentes couches ; ainsi, de la surface externe vers le centre du grain, on trouvera l'enveloppe du fruit ou péricarpe, puis l'enveloppe de la graine ou testa, et enfin, à l'intérieur de la graine, la bande hyaline, l'albumen et le germe.

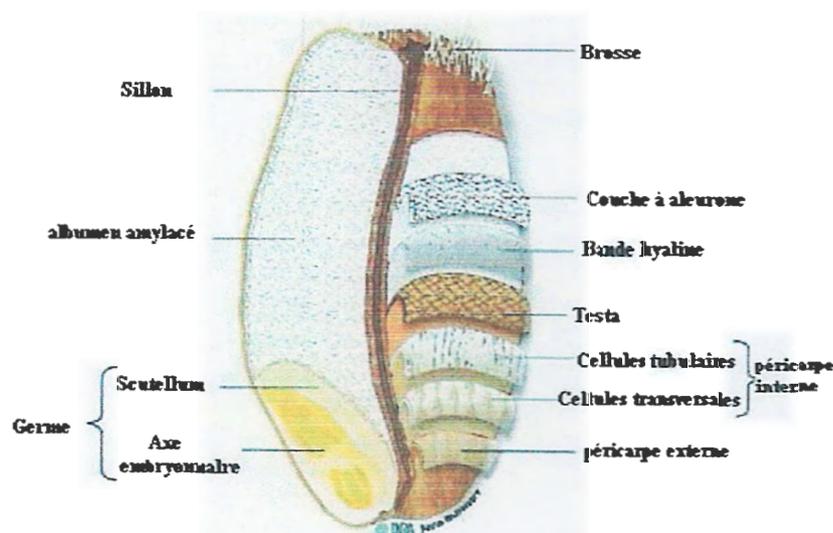


Figure N°4. Structure du grain de blé (SURGET et BARRON, 2005)

I.2.7 Composition des différents tissus du blé (SURGET et BARON, 2005)

Chacun des tissus du blé a une composition qui lui est propre. Le péricarpe est divisé en deux composantes : le péricarpe interne et le péricarpe externe. Ce dernier est constitué majoritairement de cellulose, d'hémicellulose (pentosanes) et de lignine. Le péricarpe interne est formé de trois couches cellulaires, les cellules intermédiaires, les cellules transversales et les cellules tubulaires ou endocarpe.

La testa, enveloppe de la graine, est constituée de deux couches cellulaires, et contient majoritairement les pigments et des composés lipidiques.

L'albumen est constitué de deux tissus bien distincts : la couche à aleurone et l'albumen amylicé plus interne. La couche à aleurone, riche en protéines et en lipides, renferme en outre d'importantes quantités de micronutriments (minéraux, vitamines et antioxydants). L'albumen amylicé est constitué d'amidon enchassé au sein d'une matrice protéique plus ou moins dense.

L'essentiel de l'albumen amylicé se retrouve dans les farines et semoules après mouture du grain.

Enfin, le germe constitue l'ébauche de la future plante. Celui-ci est riche en protéines, en lipides et contient également des minéraux et des vitamines.

La composition moyenne en protéines, en glucides, en lipides et en éléments minéraux du grain de blé, dans son ensemble, est telle que décrite dans le tableau 2.

Tableau №2. Composition du blé en divers éléments (en % de la matière sèche) (FEILLET, 2000)

Nature du composant	Teneur en % de la matière sèche
Protéines	10 – 15
Amidon	67 – 71
Pentosanes	8 – 10
Cellulose	2 – 4
Sucre libre	2 – 3
Lipides	2 – 3
Matières minérales	1,5 – 2,5

I.2.8 Composition du grain de blé

La composition en pourcentage de matière sèche du grain est de 70% de glucides, 12% de protéines et de 1 à 2% de lipides. Le grain contient également des vitamines (essentiellement du groupe B), des sels minéraux (calcium, magnésium, sodium, potassium, chlore, soufre, fluor...), des fibres (celluloses, hémicelluloses...), de l'eau et des enzymes (BRUGGEMAN *et al*, 1996). Celles-ci peuvent avoir des effets bénéfiques ou nuisibles au cours de la panification.

I.2.8.1 Les glucides

Ces substances énergétiques majoritaires dans le grain sont constituées de 80% d'amidon (figure 5), polymère de glucose. Il est constitué à 17-28% de chaînes linéaires d'amylose et de chaînes ramifiées plus longues d'amylopectine. Ces deux types de chaînes sont associés dans le grain d'amidon par couches concentriques formant successivement des zones amorphes et des zones cristallines.

Un ensemble de composés glucidiques de structure, comme la cellulose, est présent à environ 5% dans le grain (GODON, 1981).

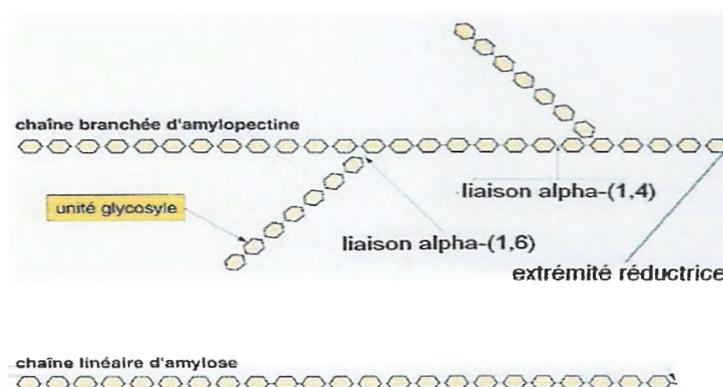


Figure №5. Structure de l'amylose et de l'amylopectine (d'après Feillet, 2000)

I.2.8.2 Les protides

Les protides sont formés d'acides aminés libres, de peptides et surtout de protéines. Les protéines de céréales sont classées selon leurs solubilité : les albumines, solubles dans l'eau ; les globulines, solubles dans les solutions salines diluées ; les prolamines dans les solutions alcooliques et les gluténines dans les solutions diluées d'acides.

Pour le grain de blé, les prolamines sont plus spécifiquement appelées les gliadines. Quant aux gluténines, elles sont nommées gluténines. Ces deux types de protéines sont les plus présents dans le grain avec respectivement sur l'ensemble des protéines 40-50% et 30-40 %. Elles constituent les protéines de réserve. Les protéines des céréales sont déficitaires en certains acides aminés, en particulier les acides aminés essentiels comme la lysine (GODON, 1981). La qualité du blé est ainsi liée au taux de protéines.

➤ Les globulines

Elles ont un rôle faible dans le processus de panification. Elles sont utilisées en partie par la levure comme nutriment. En combinaison avec les sucres ; elles participent à la réaction de Maillard qui donne une partie de sa coloration à la croûte du pain.

➤ Le gluten

Le gluten est composé de 75% à 80% de protéines (gliadines et gluténines essentiellement), 5 à 10% de lipides et de 8 à 10% d'amidon (GODON, 1991). Il a des propriétés de cohésion, d'élasticité, de viscosité et de plasticité qui lui permettent au cours de la panification, de former un réseau tridimensionnel imperméable, capable de retenir le gaz carbonique et de s'étirer sous sa pression pour former la structure et la texture alvéolée du pain (FOULD-SPRINGER, 1996). Au cours du pétrissage, les gluténines s'unissent par ponts disulfures formant une grande surface sur laquelle de nombreuses liaisons non covalentes peuvent apparaître avec des gliadines (plus lâchement associées) (GODON, 1991).

Ainsi, les gluténines sont responsables de la ténacité et de l'élasticité de la pâte et les gliadines de l'extensibilité (JEUFFROY M.H., 2000). La quantité de gluten et la qualité de ces protéines font la valeur boulangère de la farine (GODON, 1991). Une prise au microscope électronique décrit la forme du réseau du gluten qui est présentée dans la (figure 6).





Figure №6. Organisation des différentes prolamines du gluten (SHEWRY et *al*, 1995)

➤ Les gliadines

Il y a quatre gliadines dans le blé : α -, β - γ et ω -gliadines. Elles sont pauvres en acides aminés basiques et très riches en glutamine et proline. Quant à la teneur en acides aminés basiques, elle va en décroissant des alphas vers les omégas-gliadines.

La présence d'acides glutamique et aspartique sous forme amidée et la pauvreté en acides aminés basiques font de la gliadine une protéine de faible charge, qui avec une forte hydrophobicité expliquent les propriétés de solubilité particulières de cette protéine (ALAIS, 1994). Les α , β - γ -gliadines sont stabilisées par des ponts disulfures intramoléculaires et par de nombreuses liaisons Hydrogènes. Les gliadines sont extrêmement collantes lorsqu'elles sont déshydratées et n'ont pas ou peu de résistance à l'extension.

➤ Les gluténines

Les gluténines ont une teneur en résidus lysine, glycine, alanine, sérine et tyrosine fortement supérieure à celle des gliadines, mais leur teneur en acide glutamique, proline et cystéine est inférieure. Il existe deux types de gluténines ; les gluténines I à faible poids moléculaire (FPM) et les gluténines II à haut poids moléculaire (HPM). Les deux sont associées par liaisons non covalentes, essentiellement des liaisons hydrophobes (SHEWRY et *al*, 1995).

Le rapport entre gliadines et gluténines est considéré comme important dans le comportement des pâtes. Les pourcentages de gliadines et gluténines peuvent en outre être facilement déterminés grâce à leur insolubilité dans l'eau : elles peuvent donc être facilement séparées des autres éléments formant la pâte. En outre la gliadine est soluble dans l'alcool et la gluténine est soluble dans une solution alcaline. Le rôle de ces protéines dans la fabrication du pain est essentiel. Elles contribuent à former un complexe caractéristique qui donne l'élasticité et la résistance à la pâte à pain lors de sa fabrication (BERGER, 1983 ; CORNEC, 1994; BEROT et *al*, 1996 ; MOSINIAK, 2002) (figure 7).

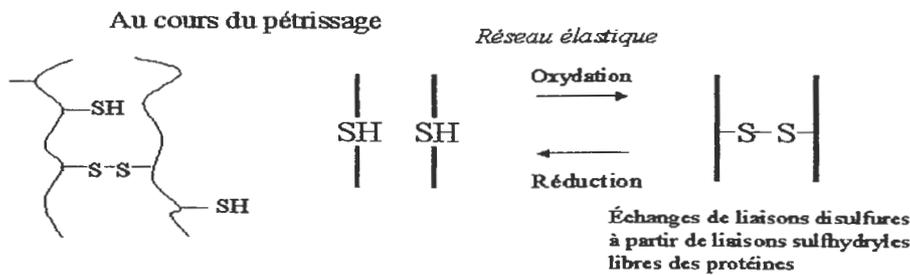
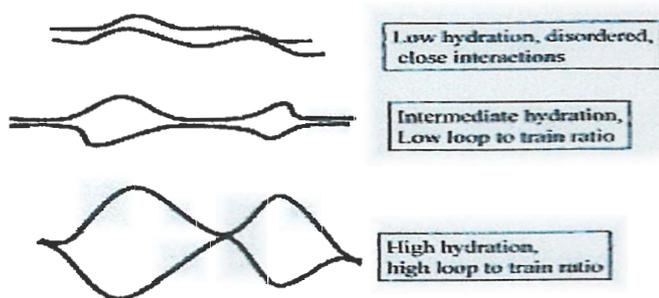


Figure №7. Formation du réseau élastique du gluten(SHEWRY et *al*, 1995).

Le complexe de protéines présent dans le gluten de Blé va donc donner à la pâte du boulanger la propriété visqueuse permettant de retenir le gaz lors de la levée (BELTON, 1999).

Ce complexe est différent dans le Maïs ou l’Avoine ce qui explique bien les différents degrés de panification de ces céréales. Pour la fabrication de la pâte à pain, la farine poudreuse va d’abord être transformée en pâte élastique et bien liée. Ces propriétés élastiques sont décrites dans la figure 8.



Figure№ 8. Model « train and loop » (SHEWRY et *al*, 1995).

Le pain s’obtient donc après cuisson de cette pâte résultant du pétrissage d’un mélange d’une farine de Blé tendre, d’eau, de sel et d’un agent de fermentation (levure). Le pétrissage (figure 9) associe et lie les différents constituants du mélange.





Figure №9. Le pétrissage assure la cohésion des protéines de blé (à gauche), le gluten forme un réseau élastique (à droite) (GREEN, 2005)

Ces propriétés particulières du gluten rendent compte de son utilisation dans d'autres domaines agro-alimentaires que celui de la panification. Il est important de souligner que le gluten peut être à l'origine d'une intolérance alimentaire, connue sous le nom de maladie cœliaque (Recherche & Santé, 2004 ; GREEN, 2005), et attribuée à certaines protéines, les ω -gliadines présentes en quantité importantes dans le Blé. Le mode d'assemblage des gluténines et gliadines est représenté dans la (figure 10).

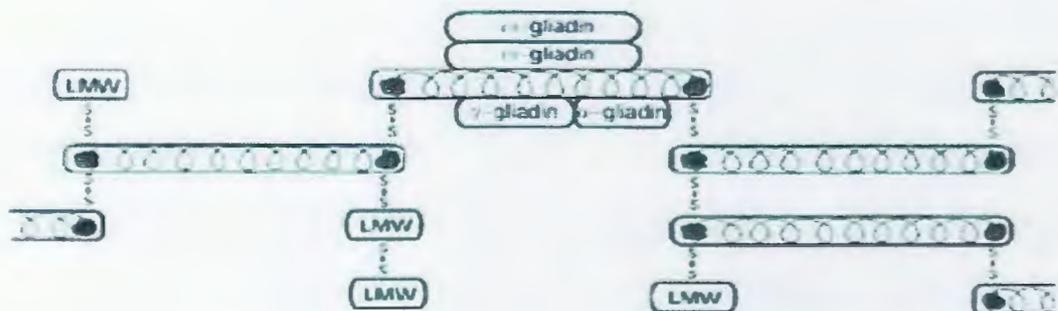


Figure №10. Model de Ewart ; association linéaire et aléatoire des prolamines (SHEWRY et al, 1995).

I.2.8.3 Les lipides

Ils sont en faible proportion dans le grain de blé et se retrouvent essentiellement dans le germe, les acides gras sont essentiellement des acides gras insaturés (63% d'acide linoléique, 15% d'acide oléique contre 18% d'acide gras saturé palmitique). Les deux tiers de ces lipides sont alors libres, alors que les autres sont liés aux autres constituants de la farine (glucides, protides). Ces lipides liés jouent un rôle important dans la cohésion et les propriétés du gluten (GODON, 1991).

I.2.8.4 Les minéraux

Tous les éléments minéraux sont représentés dans le grain, mais dans des proportions très différentes ; le potassium et le phosphore constituent 50% des matières minérales ; le soufre, le magnésium, le chlore et le calcium, 25%(GODON, 1991).

I.2.8.5 Les vitamines

Le grain de blé contient essentiellement de la vitamine PP (Niacine) et E (Tocophérols). Les vitamines B1 (Thiamine) ; B2 (Riboflavine) et B6 (Pyridoxine) sont présentes, mais en plus faible proportion. (GODON, 1991).

I.2.9 Transformation du blé

Les principales formes d'utilisation du blé sont la farine pour le blé tendre, et la semoule pour le blé dur. Les différentes filières pour la valorisation et l'exploitation du blé sont présentées sur la (figure 12).

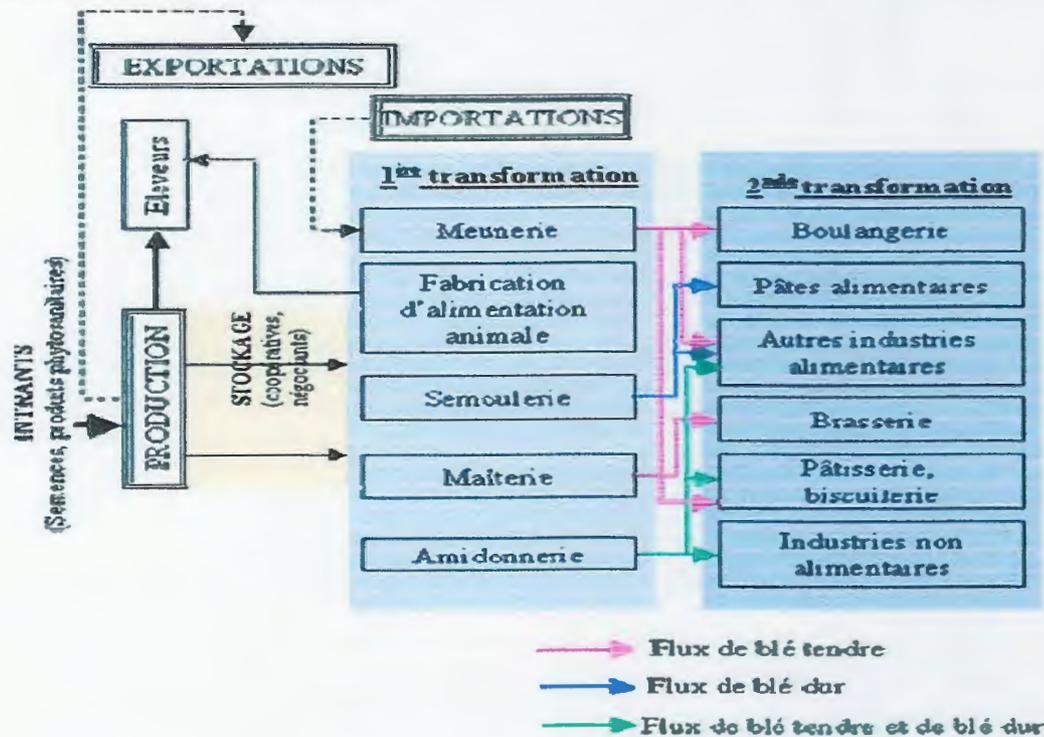


Figure №11. Filière de transformation du blé (CAZALIS et al, 2006).

Une part du blé produit sera destinée à l'exportation, l'alimentation animale et à la première transformation (Meunerie, semoulerie...). En seconde transformation, le blé est utilisé en boulangeries, pâtisseries ainsi que dans d'autres industries alimentaires et non alimentaires.

Le procédé de première transformation du blé comporte plusieurs étapes. La cargaison de blé produite sera déchargée au niveau des silos de stockage, pour les cas où celle-ci répond au cahier des charges évoqué précédemment.

La mise en silo sera effectuée après nettoyage et dépoussiérage des grains. Au cours d'une seconde phase de nettoyage du blé, juste avant la mouture, les métaux, pierres, roches, graines et pailles sont éliminées. Une fois ces opérations terminées, le blé est humidifié (conditionnement) pour atteindre un taux final d'humidité compris entre 16 et 18%. Le blé est alors prêt pour la transformation, par mouture, en farine ou en semoule.

Le principe de la mouture consiste à passer le blé successivement dans des broyeurs ayant des caractéristiques différentes. Les grains passent entre deux cylindres cannelés tournant en sens inverse et à des vitesses différentes. Plus on descend dans la ligne de broyage, plus les cannelures des cylindres deviennent fines et rapprochées, cette opération permettant de séparer l'enveloppe de l'amande. Des broyeurs à cylindres lisses permettent d'obtenir les produits les plus fins (farines). La séparation et la purification des produits obtenus sont réalisées par un système de tamis de maillage de plus en plus petit. Les étapes du procédé de mouture ne doivent pas être fondamentalement modifiées ou gênées suite à l'application de nouveaux traitements sur le blé, tels que ceux visant à l'amélioration de la qualité sanitaire du blé (CAZALIS *et al*, 2006).

I.2.9.1 Diagramme général de mouture

La mouture a pour but de séparer l'amande de ses enveloppes pour la transformer en farine. Elle comporte deux systèmes principaux : le système de rupture du grain (le broyage) et le système de réduction en farine (claquage et convertissage). (MASY, 1987-TOFFALORI, 1993).

Le blé passe donc à travers une série d'appareils qui servent à la moudre et à séparer les produits de cette mouture.

Le mélange des différentes farines blanches représentant la part la plus importante (75 à 80 %), est obtenu en poursuivant le cycle de mouture jusqu'à la fin. Les produits finis résultant de chacune des manipulations successives, ne subiront plus aucun traitement. La part de farine réservée au terme de chacune des étapes sera utilisée sous le nom de l'étape où la mouture s'est arrêtée. A la première étape, on obtient ainsi la farine de broyage et les sons gros et fins.

A la deuxième étape la farine de claquage, les germes et les remoulages bis. A la troisième étape la farine de convertissage (MONNEHAY, 1993).

Le mélange des farines de qualités différentes obtenues à chaque étape de la mouture (farine de claquage, de broyage et de convertissage) donne la farine du boulanger ou farine entière (MONNEHAY, 1993) (figure 12).

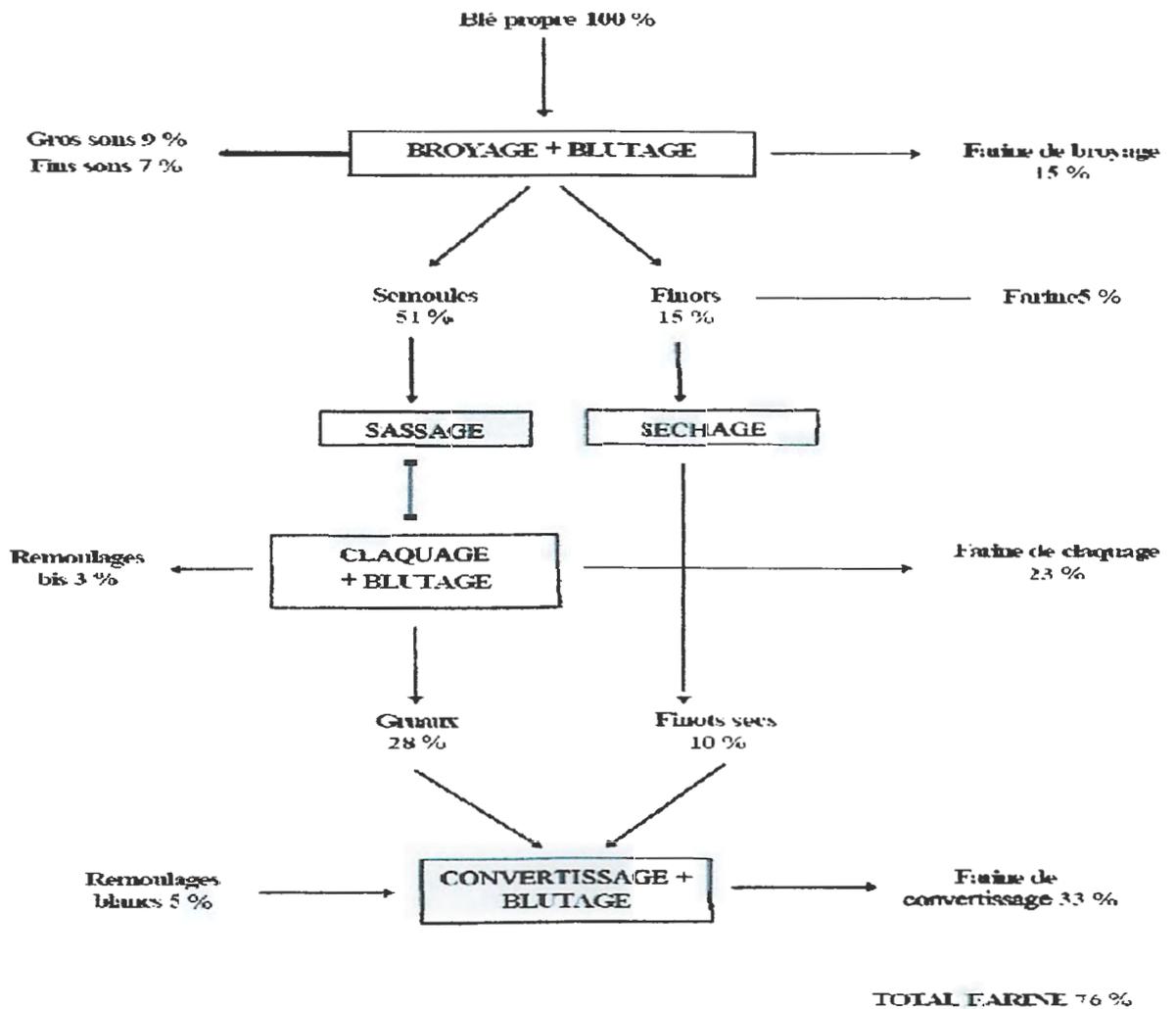


Figure №12. Diagramme de mouture
(GODON, 1991)

I.2.9.2 Caractéristiques des farines

La farine est caractérisée par ses taux d'extraction, de blutage et des cendres.

→ **Le taux d'extraction** est exprimé par le rapport « poids de farine extraite sur 100 kg de blé mis en œuvre ». Il représente donc la quantité de farine retirée de 100kg de blé (CALVEL, 1964).

Plus il est élevé, plus il y a de risques que la farine contienne du son. La farine de faible taux d'extraction présente de meilleures caractéristiques organoleptiques (aspect plus blanc) et fonctionnelles (pâte boulangère) (CHEFTEL, 1992).

→ **Le taux de blutage** représente la quantité de sons et remoulages recueillis au cours de la mouture de 100kg de blé (CALVEL, 1964 ; MASY, 1989).

→ **Le taux de cendres** exprime la pureté des farines et correspond à la quantité de minéraux ; principalement contenus dans les sons, et encore mélangés à la farine. Plus la farine est pure, plus il est faible (MASY, 1989- MONNEHAY, 1993).

Le taux de cendres d'une farine dépend à la fois du taux d'extraction et de la minéralisation des grains passés en mouture (GODON, 1994). Celui-ci est strictement réglementé. Les farines sont classées selon différents types en fonction du poids de cendres contenu dans 100g de matières sèches (tableau 3).

Tableau №3. Différents types de farines de blé et de seigle en fonction du taux de cendres (GODON et WILLM, 1991)

Farines	Dénomination	Taux de cendre de la farine, en % de la matière sèche
Blé	Type 45	Au dessous de 0,50%
	Type 55	De 0,50 à 0,60
	Type 65	De 0,62 à 0,75
	Type 80	De 0,75 à 0,90
	Type 110	De 1,00 à 1,20
	Type 150	Au dessus de 1,40

I.2.10 Rhéologie de la pâte à pain. Influence des constituants de la farine

La farine est constituée de plusieurs éléments. Selon les quantités (ratio) de chacun, elles seront destinées soit à la biscuiterie, la pâtisserie ou la panification. La valeur boulangère d'une farine est en relation avec la quantité et la qualité des protéines du gluten, et des aptitudes fermentatives de la pâte qui dépendent surtout de son pouvoir diastasique et de sa richesse en sucrose. De même, plusieurs des constituants de la farine ont une influence directe ou indirecte sur la couleur et la rhéologie des pâtes à pain (MATZ, 1991).

I.2.10.1 Glucides

➤ L'amidon

C'est le principal constituant de la farine. Il représente environ 72 % de la farine. Ce glucide complexe est formé de deux polymères : l'amylose et l'amylopectine. Ces deux molécules sont des polymères de l' α -D-glucose. Chaque granule d'amidon contient plusieurs millions de molécules d'amylopectine accompagnées par davantage de molécules d'amylose plus petites (voir la Figure 14). Ces molécules absorbent l'eau et, à la chaleur, forment un gel essentiel à la transformation de la farine en pain (BOUDREAU, 1992). Elles agissent aussi comme agent de remplissage et de dilution du gluten (FEUILLET et al, 1994). Lors des opérations de mouture et de pétrissage, environ

2 à 10 % de l'amidon est endommagé, ce qui augmente l'absorption d'eau. La forme endommagée peut absorber jusqu'à deux fois plus d'eau que la forme native de la molécule, ce qui amène une plus grande disponibilité de l'amidon aux amylases (α -amylase, β -amylase, Isoamylase). Sous l'influence des amylases, une certaine quantité d'amidon est transformée en maltose, qui pourra être utilisée par les levures pour la production de gaz entraînant aussi un ramollissement de la pâte et donc des propriétés rhéologiques différentes (BLOKSMA et BUSHUK, 1988). L'état de l'amidon peut influencer le temps de pétrissage. (MATZ, 1987).

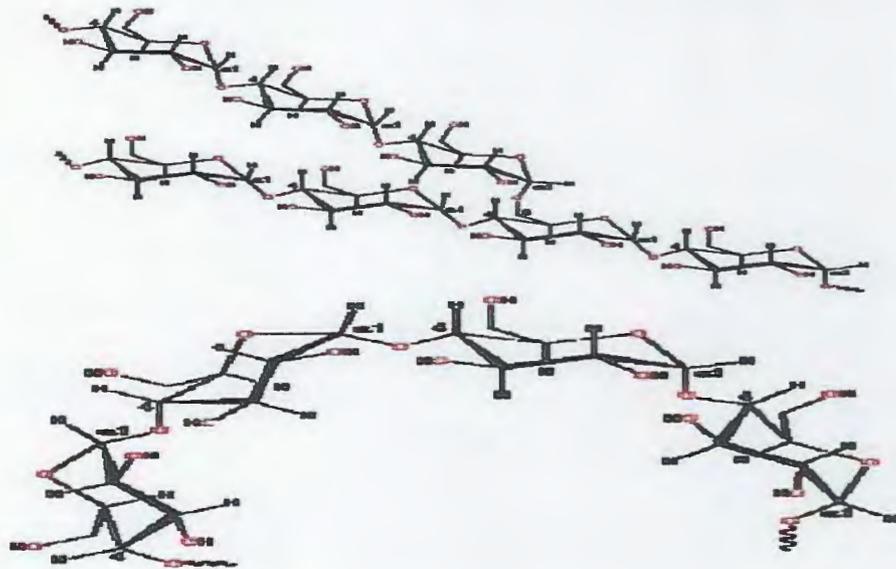


Figure №13. Structure moléculaire de l'amidon (CARENTINO , 1996).

➤ Sucres simples

Le blé contient plusieurs sucres simples ou disaccharides (glucose, fructose, saccharose). Habituellement, moins de 0,1 % est retrouvé dans la farine (MATZ, 1987) ce qui leur attribue un rôle superficiel comme source d'énergie pour les levures. Dans les faits, ce sont surtout les amyloses et les amylopectines clivées en sucres fermentescibles qui seront utilisés comme sources d'énergie par la levure. Les glucides n'ont pas d'effets notables sur la rhéologie des pâtes à pain. Les sucres simples ont une influence sur la couleur du pain par l'intermédiaire de la réaction de Maillard. Mais cette réaction entre un acide aminé et un sucre simple se déroule sur la surface extérieure du pain lors de sa cuisson, et par conséquent n'affecte pas la couleur de la mie (MATZ, 1991).

➤ Cellulose et pentosanes

Bien que la cellulose soit présente dans le péricarpe (2 à 2,5 %), elle est très peu présente dans l'endosperme ; par conséquent c'est à l'état de trace qu'on la retrouve dans la farine blanche. Les pentosanes (hémicelluloses) sont aussi des glucides. Même si elles ne représentent que 2 à 3 % de la farine, leur pouvoir absorbant est d'environ 10 fois leur poids sec, ce qui correspond au quart de l'hydratation de la pâte à pain (BLOKSMA et BUSHUK, 1988) (figure 14).

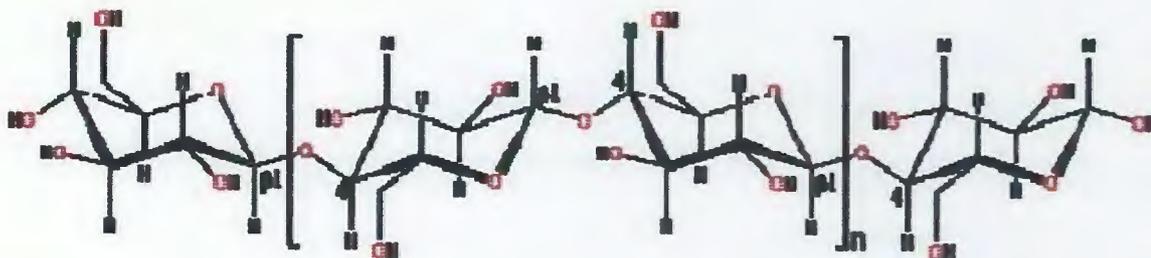


Figure N°14. Structure moléculaire de la cellulose (CARENTINO, 1996).

➤ Fibres

L'endosperme renferme peu de fibres alimentaires. Par conséquent, la farine blanche en contient environ 2,78 % sur base sèche (MATZ, 1991) ; leur présence peut donner une coloration plus brunâtre à la mie.

I.2.10.2 Protéines

Quantitativement, les protéines sont le deuxième élément le plus important dans la farine. Elles se retrouvent dans l'endosperme (73 %), le son (19 %) et le germe (8 %). Elles représentent en général 11 à 13,5 % (base sèche) de la farine panifiable (BUSKUK et SCANLON, 1993). La teneur en protéines des farines est souvent l'unique critère servant à évaluer les propriétés panifiables d'une farine (PARE et GELINAS, 1995). Elles sont classées en protéines solubles dans l'eau, principalement les albumines et les globulines (15 à 20 % des protéines totales). Et en protéines insolubles (80 à 85%) dans l'eau dont les gliadines et les gluténines qui forment le gluten. Les gliadines (solubles dans l'éthanol à 70 %) sont principalement des monomères retenus par des liens hydrogènes non covalents et des interactions hydrophobes. Certains polymères structurellement semblables aux gluténines font aussi partie de ces sous-unités. Les gluténines (essentiellement insolubles dans l'éthanol à 70 %) sont des protéines ou des sous-unités assemblées par des liens covalents sous forme de polymères ayant un poids moléculaire élevé (MATZ, 1991). Environ 30 % des acides aminés composant la gluténine sont des glutamines, lesquelles fournissent plusieurs groupes amines pour former des ponts hydrogène inter- et intramoléculaires qui exercent un effet important sur les propriétés rhéologiques (PYLER, 1988). Ce sont les protéines insolubles dans l'eau qui semblent constituer le facteur critique dans la fonctionnalité panariaire (BLOKSMA et BUSHUK, 1988). C'est lors du développement de la pâte que les groupes sulfuriques interagissent.

L'oxydation permet la formation de ponts disulfures (lien covalent) intra- et intermoléculaires. Il en résulte un réseau plus complexe. Plus rigide et qui augmente sa capacité de rétention des gaz (PYLER 1988). L'oxydation permet une augmentation de l'élasticité de la pâte, une meilleure maniabilité et une amélioration du volume final du pain (STAUFFER, 1990). Les liens disulfures intramoléculaires assurent la stabilité de chaque structure. La réduction détruit ces liens ; à l'opposé, l'oxydation permet leur régénération en diminuant le nombre de groupements thiol (NICOLAS et PONIS, 1994).

Malgré qu'il n'yait que 8 groupes disulfures par 1000 résidus d'acides aminés et que seulement une fraction des groupes thiol s'oxyde lors du pétrissage, ces derniers ont une importance significative sur la rhéologie.

L'hydratation des gliadines donne une structure visqueuse et peu élastique alors que les gluténines sont cohésives et élastiques. Les propriétés d'élasticité de la pâte sous l'action du pétrissage dépendent des liaisons disulfures intermoléculaires des gluténines. Ces protéines ont un effet critique sur les propriétés rhéologiques de la pâte. Quand la pâte est pétrie, les ponts disulfures sont brisés par le stress imposé et sont par la suite reformés. Lorsqu'il y a présence d'agent oxydant dans une pâte, la formation de nouveaux liens disulfures (renforçant la structure de la pâte) est facilitée. Par contre, une suroxydation donne une pâte trèsrésistante qui se déchire facilement, un pain de plus petit volume et une mie moins uniforme (PYLER, 1988).

I.2.10.3 L'eau

La quantité d'eau présente dans la pâte a des répercussions directes sur son comportement rhéologique. L'eau présente dans la farine permet de reporter les différentes analyses de la farine sur une base uniforme de 14 % d'humidité (CASTELLO *et al*, 1999).

I.2.10.4 Lipides

Les lipides sont présents sous plus d'une vingtaine de formes dans la farine mais ne représentent que 0,8 à 2 % (base sèche) de la farine (MATZ, 1987). De ceux-ci, 50,9 % des lipides sont non polaires et 49,1 % des lipides sont polaires (PYLER, 1988). Ils jouent un rôle important en rhéologie, principalement en association avec les protéines. Bien que les lipides présents aient peu d'influence sur le plan nutritionnel, ils jouent des rôles d'agents lubrifiants et d'agents tensioactifs. Le gluten peut changer de structure lorsque la farine est délipidée (MATZ, 1987). Mais il semble que l'absence de lipides normalement présents dans la farine n'altère pas les propriétés rhéologiques de la pâte (MILLER et HOSENEY, 1999).

I.2.10.5 Vitamines

Le blé contient une quantité appréciable de vitamines que l'on retrouve surtout dans le son et le germe. Les vitamines du groupe B représentent environ 4,6 mg de thiamine/kg (de grain). 1.3 mg de riboflavine/kg et 55mg de niacine/kg ; la mouture détruit une partie de ces vitamines (MATZ, 1991).

I.2.10.6 Minéraux

Les minéraux présents dans la farine sont des matières inertes et leurs effets sur la qualité boulangère de la farine sont négligeables bien qu'ils puissent avoir un effet sur la couleur. Les principaux minéraux de la farine sont le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium. Dans une moindre mesure, il y a le zinc, le fer, le manganèse, le cuivre et l'aluminium (MATZ, 1987). La teneur en cendres de la farine panifiable se situe habituellement autour de 0.3 à 0,6 %. Une trop grande concentration (> 0,6 %) de

minéraux peut influencer la couleur en donnant une teinte grise ou une moins grande brillance à la mie (MISKELLY 1984 ; BOURDEAU, 1992).

I.2.10.7 Enzymes

Les enzymes les plus importantes sont les protéases. Les amylases, les lipases, les lipoxygénases, les peroxydases et les catalases. Les quatre derniers types d'enzymes sont impliqués dans la décoloration. Elles sont actives de la mouture du grain jusqu'à la cuisson du pain.

Autrefois, les longues périodes d'entreposage de la farine permettaient à cette dernière de subir diverses modifications enzymatiques, ce qui favorisait la décoloration (oxydation des pigments) et était souvent bénéfique aux qualités boulangères de la farine (KANEKO et al, 1995).

I.2.11 Débouchés :

La diversité d'utilisation des farines entraîne une diversité de leurs caractéristiques. L'important est de connaître les relations qui existent entre la composition et les propriétés des composants d'une part et l'adéquation d'une farine à son emploi d'autre part (GODON, 1995).

Farine destinée à :

a. La panification

Il existe deux techniques de panification : les pétrissages lent et rapide. Le pétrissage participe à la formation et au renforcement du réseau glutineux. Le pétrissage lent : le rassemblement des protéines est progressif, la force boulangère (W) est plus faible et l'extensibilité (G) plus grande que pour le pétrissage rapide.

On sait que la panification nécessite une farine avec un taux de protéines supérieur à 7 %. Le taux de protéines et surtout leurs caractéristiques exercent donc un rôle important dans l'évaluation de la qualité boulangère des farines. La difficulté en panification est de trouver un équilibre pour amener le réseau glutineux à son maximum d'extensibilité sans le rendre fragile et poreux à la poussée gazeuse. Le choix des blés et l'apport de gluten permettent d'atteindre un tel but.

b. Autres usages que la panification courante

Pains spéciaux

Ces pains sont consommés dans un souci de santé, de « forme » ou de goût. Par rapport à des pains ordinaires, ces pains contiennent plus ou moins d'issues de meunerie, de graines ou de farine d'autres céréales, de graines oléagineuses. De plus, on y ajoute des matières végétales diverses issues ou non de céréales. Le fait d'ajouter d'autres substances que le blé entraîne une diminution de la force de la pâte et un collant qui influe sur le

process. Un apport de gluten est souvent nécessaire pour empêcher que la pâte ne soit rendue trop fragile par l'incorporation de ces graines.

Vienniserie et panification Fine

Ces produits contiennent des sucres et matières grasses ajoutés, ce qui diminue la force de la pâte. Les sucres augmentent la vitesse de fermentation en agissant sur la levure et influent sur la viscosité de la pâte. Les matières grasses assouplissent les pâtes et les rendent rapidement collantes grâce à leur action lubrifiante. Pour cela, ces produits nécessitent une farine de force élevée.

Biscuiterie

les produits de la biscuiterie sont très variés. La tendance générale est de choisir des farines extraites de blé friable et à faible teneur en protéines (moins de 11 %) pour limiter la formation d'un réseau glutineux trop résistant. De cette manière, on évite la rupture et la rétraction des pâtes après découpe. Ces farines ont, en général, un W, P et P / L faibles et un G élevé.

Amidonnerie / Glutennerie

deux caractéristiques de la farine influent sur le produit fini : la valeur élevée du taux et de la qualité des protéines insolubles d'une part et la ténacité de leur extraction d'autre part.

c. Utilisation non alimentaire

La farine est aussi utilisée de manière marginale. Elle entre dans la composition de colorants, de matériaux de construction, ou sert comme ingrédient d'abrasion ou composants de formulation de produits nouveaux.

1.2.12 Qualité du blé

Le choix du blé dépend de la qualité de la farine et donc du pain. Il existe, de nos jours, de nombreuses variétés de blé obtenues par hybridation, c'est-à-dire par croisement des variétés.

Ce système s'est raffiné afin d'obtenir des blés de qualité pour l'agriculteur et le meunier. En effet, l'agriculteur choisira des semences en fonction de leurs potentialités et de leur bonne résistance aux maladies et aux intempéries. Le meunier, quant à lui, recherchera le meilleur rendement possible en farine et une variété de blé dont les enveloppes, le son, se détachent facilement.

Il doit se préoccuper également du dernier intervenant : le boulanger, qui souhaitera une bonne qualité boulangère de la matière première, ainsi que des farines à taux de matières protéiques nécessaires à une bonne machinabilité (pâte se détachant sans coller des machines de pétrissage) (GODON, 1991).

Pour obtenir les propriétés souhaitées d'une farine, un mélange de plusieurs variétés de blé nécessaire

I.2.12.1 Qu'est-ce qu'un blé de qualité ?

Le terme de « qualité » des blés est surtout lié à la valeur boulangère, c'est-à-dire à son aptitude à fournir, à partir de sa farine, un pain bien développé, d'un bel aspect, d'une odeur et saveur agréable dans de bonnes conditions de travail et de rendement (GODON, 1991). Cette farine, de bonne qualité boulangère doit donc être extraite d'un blé dit sain, loyal et marchand qui satisfait à des conditions strictes d'humidité, de grosseur des grains et de taux maximal d'impuretés, avec l'absence d'odeurs et d'insectes vivants (GODON, 1995) (tableau 4).

Tableau №4. Critères de qualité du blé tendre (GODON, 1995)

◇ Poids spécifique	≥70 Kg
◇ Teneur en eau	≤ 18%
◇ Impuretés	
• Diverses	≤4%
• Grains germés	≤5%
• Grains cassés	≤5%
• Grains échaudés, petits grains	≤6%
• Présence de seigle et autres céréales	≤10%

I.2.12.2 Facteurs biochimiques et génétique influençant la qualité des blés

Pour BOUDREAU, 1992, la « force » d'une farine ou d'un blé, composante essentielle de la qualité boulangère serait « la plus ou moins grande aptitude des farines à s'hydrater, puis des aptitudes à se développer tout en retenant le CO₂ formé depuis la fermentation jusqu'à la cuisson ».

I.2.13 Tests d'appréciation de la qualité

Il existe trois types de mesure pour apprécier la qualité du blé.

▪ Les mesures physiques

Elles se font dès la réception en organismes de stockage et permettent de cerner la qualité du lot, de détecter les problèmes de qualité (blés humides, présence d'insectes...) et donc d'agir en conséquence sur la conduite du stockage.

La mesure de la teneur en eau par un humidimètre est simple et rapide. Elle peut donc s'effectuer dans le cadre des transactions commerciales.

La composition en eau des farines varie de 15 à 16% en fin de mouture. Cette teneur en eau est une condition importante de la bonne conservation des farines. Elle intervient dans le

taux d'hydratation des pâtes et donc dans leurs caractéristiques rhéologiques (GODON, WLLM .1991).

La masse à l'hectolitre, c'est-à-dire la masse volumique, plus communément appelée poids spécifique (PS), est la masse d'un hectolitre de grains mesurée en kilogramme. Toujours prise en compte dans les contrats commerciaux et dans les transactions, son intérêt technique est contestable. En effet, cette mesure est influencée par différents facteurs comme la présence d'impuretés ou la teneur en eau. Par exemple, la présence d'impuretés de gros volume ; mais de faible densité (pailles...) provoque une diminution du PS.

La teneur en impuretés est donnée après tamisage et/ou triage d'un échantillon. En effet, les lots de blé contiennent toujours en plus ou moins une grande quantité des grains cassés, des grains germés, des impuretés divers (débris végétaux et animaux...), des graines étrangères à l'espèce (GODON, 1995)

▪ Les mesures globales

Elles donnent une réponse complète sur la valeur d'utilisation puisqu'elles consistent à fabriquer le produit pour lequel on veut apprécier la qualité du blé. Elles ont l'inconvénient d'être longues et de demander une quantité importante de produit(GODON, 1995).

Trois types de tests existent :

1. **L'électrophorèse des protéines** permettant d'identifier la variété d'un blé, ce qui renseigne sur sa valeur d'utilisation.
2. **Le test de machinabilité** qui consiste à préparer de la pâte afin d'observer la machinabilité, c'est-à-dire sa capacité à constituer une masse cohérente n'adhérant pratiquement pas aux parois.
3. **Le test de panification** reproduisant à l'échelle le diagramme de panification.

▪ Les mesures indirectes

Elles sont fondées sur les connaissances de la rhéologie des pâtes et des relations entre les constituants du grain et de la qualité. Il faut connaître les résultats de plusieurs tests pour avoir une idée plus juste de la qualité, car ils ne donnent qu'une image partielle de la valeur du blé.

1-Temps de chute d'Hagberg :(activité amylolytique)

La méthode dite dutemps de chute d'Hagberg permet de déterminer indirectement la teneur en α -amylase d'une farine. Elle consiste à mesurer la consistance d'unesuspension de farine dans l'eau placée dans un tube viscosimétrique et plongée dans un bain-marie porté à l'ébullition. La consistance est appréciée en mesurant le temps mis par un plongeur de géométrie parfaitement définie pour s'enfoncer d'une distance fixée à l'avance au sein de la suspension de farine. Considérant que plus la teneur en α -amylase de la farine est élevée, plus l'amidon est hydrolysé, plus la consistance de l'empois formé lors du chauffage de la suspension est faible et plus le plongeur descend rapidement dans le tube, on admet que la teneur en α -amylase est inversement proportionnelle au temps de chute du plongeur. Le résultat est exprimé en secondes.

En fait, le temps de chute d'Hagberg ne dépend pas uniquement de la teneur en α -amylase de la farine. Il dépend également du degré d'endommagement des granules d'amidon : plus

celui-ci est important, plus l'amidon est rapidement hydrolysé et moins le temps de chute est élevé. (FEILLET, 2000).

La teneur en protéines est calculée à partir de la teneur en azote déterminée par la méthode de Kjeldhal. Elle est intéressante à déterminer ; car elle est en forte relation avec la valeur d'utilisation des variétés (GODON, 1995).

2-Test de sédimentation de Zeleny-Norme AFNOR NF V-03-704

Le Test de sédimentation de ZELENY (1947) est utilisé pour apprécier la qualité des blés aussi bien en sélection que dans les transactions commerciales. Ce test ne comporte ni extraction préalable de gluten, ni dosage chimique, il est de réalisation facile et permet d'apprécier de façon rapide la force des blés.

Son principe consiste à la mise en suspension dans une solution d'acide lactique, en présence de bleu de bromophenol, d'une farine expérimentale de blé tendre obtenue dans des conditions spécifiques de broyage et tamisage. Après un temps d'agitation et de repos définis, on lit dans une éprouvette graduée le volume de dépôt résultant de la sédimentation des particules de farines et des protéines extraites. Ce volume de dépôt, exprimé en millilitres est ce qu'on appelle l'indice de sédimentation.

➤ La valeur de cet indice varie entre 12 et 70 et les blés panifiables se situent entre 20 et 40. Cet indice est largement dépendant de la teneur en protéines et de la vitrosité du grain. Ce test de sédimentation est très influencé par la viscosité de la suspension. L'opérateur devra donc veiller à faire ce test dans une pièce tempérée et à l'abri de l'ensoleillement direct. (GODON, LOISEL, 1997).

3- Alvéographe de Chopin

Il est très utilisé par la meunerie car ses résultats sont très utiles notamment pour associer en mélange des blés ou des farines de caractères complémentaires. Il est aussi employé en amont de la filière au niveau de la commercialisation des blés, sélection et jugement des variétés ainsi qu'en aval au niveau des industries de cuisson.

L'alvéographe permet d'étudier les principaux paramètres rhéologiques (plastiques) de la pâte en faisant subir à une éprouvette de pâte des déformations (obtention d'une bulle de pâte) qui ressemblent à celles subies lors de la fermentation panaire, sous la pression d'un gaz carbonique l'enregistrement graphique des déformations ou alvéogramme renseigne essentiellement sur la ténacité ou pression (P_{max}) qui exprime la résistance de la pâte à la déformation, l'extensibilité (L) ou le gonflement (G) qui exprime la possibilité de développement de la pâte jusqu'à sa rupture, la force (W) qui représente le travail de déformation de la pâte et le rapport P/L .

Pour une pâte convenable, ténacité et extensibilité ne doivent pas dépasser un niveau minimal mais aussi s'équilibrer entre elles (P/L) (Figure 15).

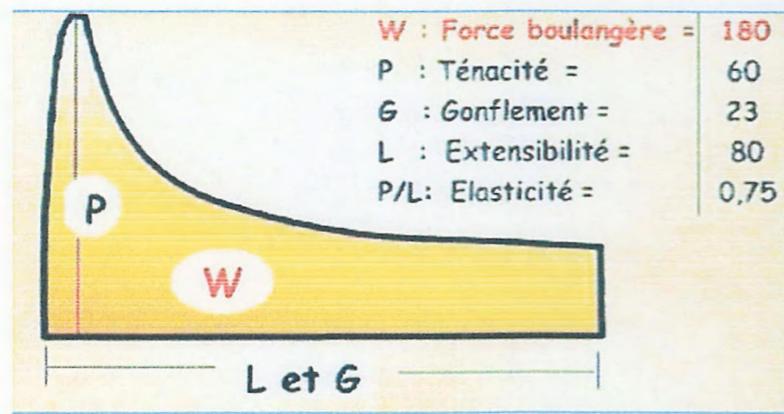


Figure №15. Les paramètres technologiques de panification du blé (CAZALIS, 2006).

La conception de l'alveographe (CHOPIN, 1973) et les évolutions apportées à sa manipulation en font aujourd'hui un appareil utilisé dans de nombreuses applications pour :

- Contrôler la qualité des blés en sélection et à la collecte.
- Optimiser les mélanges des blés et farines.
- Améliorer les caractéristiques plastiques des farines en permettant le choix et le dosage des éléments correcteurs.
- répondre aux spécifications des divers transformateurs. (GODON, LOISEL, 1997).

Chapitre II

II.1 Classification des protéines de réserve du blé

La graine de blé est un organe de réserve contenant de l'amidon, des protéines, des lipides et des sels minéraux. L'amidon est la composante la plus abondante dans la graine. Sa teneur peut atteindre 85% du poids sec de la farine de blé. Celles des protéines varient de 8 à 16% du poids sec de la graine. Ces protéines de réserve sont synthétisées dans une graine, qui agit comme puits pour stocker le surplus d'azote de la plante en protéines. De plus, les protéines sont accumulées dans les graines matures et formant des agrégats appelés corps d'inclusion ou « protein bodies » (SHEWRY et *al*, 1995). Grâce à leur abondance et à leur importance alimentaire dans le monde entier, les protéines de réserve ont bénéficié de plusieurs études depuis la première publication de BECCARI, 1745. La classification de ces protéines de réserve est souvent basée d'une part sur leur solubilité dans l'eau, les solutions salines, dans divers solvants et d'autre part sur leur mobilité dans un gel d'électrophorèse SDS-PAGE (PAYNE et CORFIELD 1987; SHEWRY et TATHAM, 1990). D'ailleurs, une extraction séquentielle, à partir de la farine, a permis à OSBORNE, 1924 de regrouper les protéines de réserve en groupes d'albumines, de globulines et de gluten. Les albumines et les globulines représentent un groupe de protéines solubles dans une solution saline et sont présentes dans l'embryon et dans l'endosperme de la graine (MACRITCHIE, 1985). Ces protéines représentent 10% Des protéines totales de la graine, mais elles sont très hétérogènes. On trouve ainsi des enzymes, des inhibiteurs d'enzymes, des émulsifiants, etc.... Le gluten est une macro protéine insoluble dans l'eau qui peut atteindre un poids moléculaire de plusieurs millions de daltons formant ainsi une masse viscoélastique résiduelle après plusieurs lavages de la pâte (MACRITCHIE et *al*, 1990). Les autres protéines et l'amidon sont éliminés par lavage dans une solution saline. La macromolécule du gluten est, en effet, une agrégation de monomères de gliadines et de polymères de gluténines. Des études plus approfondies des propriétés physico-chimiques des gliadines et des gluténines ont conduit SHEWRY et *al*, 1986, à proposer une nouvelle classification qui ne recouvre que partiellement celle d'OSBORNE, 1924. Les prolamines (des protéines de réserve riche en proline et glutamine). En effet, la richesse en acides aminés soufrés et le degré de polymérisation des composantes du gluten sont les seuls critères de classification au sein de la famille des prolamines (Figure 16).

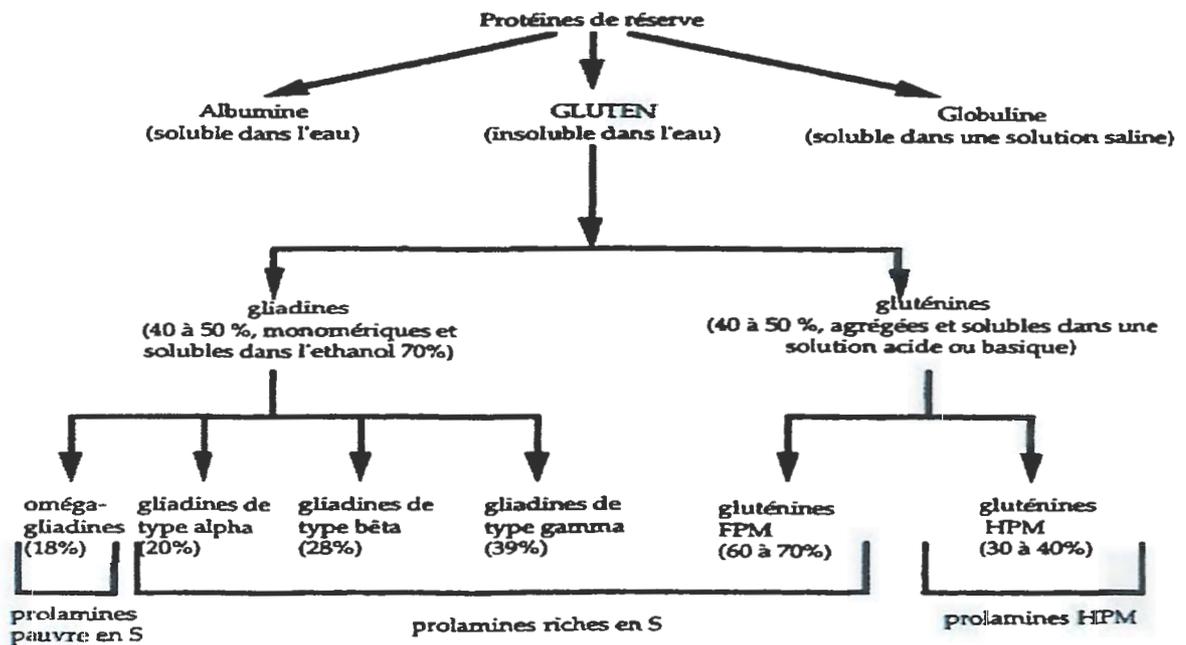


Figure 16. Classification des protéines de réserve du blé (SHEWRY et al, 1986)

D’ailleurs, le haut degré de polymérisation a permis aux gluténines de HPM d’occuper une place unique, celles des prolamines HPM. Les gluténines à FPM et les gamma, bêta et alpha-gliadines sont réunies dans le groupe de prolamines riche en acides aminés sulfurés. Par contre le troisième groupe de prolamines, pauvre en acides aminés sulfurés, est représenté par les oméga-gliadines (Tableau 5).

Tableau 5. Différentes classes des protéines du grain du blé (SHEWRY, 1986 ; SINGH, 1988).

Groupes	Solubilités	Poids Molaire (kDa)	Composition	Structure	Localisation Des gènes	Fonction
Albumines	Eau	5 à 90%				Protéines de structure fonctionnelles
Globulines	Sels neutres					Protéines de structure fonctionnelles
Gliadines	Alcools dilués	25 à 75%	ω pauvres en S α , β et γ Riches en S	Monomériques	Gli-1 (1A,1B,1D)	Protéines de réserve ou de prolamines
Gluténines	Acides, Bases	≥ 100	Riches en S	Agrégées ou polymérisées	Glu-3 (1A,1B,1D)	Protéines de réserve ou de prolamines

II.2 Protéines de réserve

Ce sont des structures macro protéiques, appelées encore gluten, décrites pour la première fois par BECCARI, 1745. Le gluten est généralement défini comme la masse viscoélastique qui reste après un lavage complet de l'amidon de la pâte. Les principaux composants du gluten sont les protéines avec un taux varie entre 75 et 85%, liées à des lipides (5 à 10%) et des traces d'autres élément tels que des vitamines, etc. (WRIGLEY et BIETZ, 1988).

Ces protéines sont déposées dans l'albumen, leur seul rôle biologique est de fournir un stock d'acides aminés nécessaires pour la germination de l'embryon. Elles sont synthétisées dans le réticulum endoplasmique et sont ensuite déposées dans des corps protéiques, sortes de petites vacuoles ayant environ 1 micron de diamètre (SIMMOND ET O'BRIEN, 1981). Au moment où les cellules de l'albumen se remplissent d'amidon, les corps protéiques fusionnent puis éclatent lors de la déshydratation du grain pour former une matrice qui va entourer d'une manière plus ou moins continue les granules d'amidon (PYLER, 1988).

Pour chaque céréale des noms spécifiques ont été donnés à la fraction protéique pour les blés apparentés comme les blés cultivés, les prolamines sont nommées gliadines et les glutélines sont appelées gluténines.

Depuis longtemps, on sait que les différences variétales de la qualité sont dues en majeure partie au gluten. Les propriétés de ténacité, d'élasticité et d'extensibilité de la pâte, généralement différentes d'une variété à l'autre, résultent des caractéristiques des nombreuses protéines constitutives du gluten (BRANLARD et *al*, 1989) (Figure 17).



Figure 17. Le gluten : sans les propriétés, uniques dans le règne végétal, de viscoélasticité de ses protéines, la panification n'aurait pas été possible (photo INRA Clermont Ferrand - BRANLARD et *al*, 2001).

Dans celles-ci, on distingue deux grandes familles : les gliadines solubles dans une solution alcoolique, dont le poids moléculaire est compris entre 30 et 80 kDa et qui sont très polymorphes, et les gluténines solubles dans une solution acide. Les gluténines qui ont un poids moléculaire supérieur à $3 \cdot 10^6$ Da sont réduites en sous-unités, par l'action d'un réducteur, en deux

groupes donnant : les sous-unités gluténines de haut poids (SG-HPM) et celles de faible poids moléculaire (SG-FPM).

Ces sous-unités gluténines (SG-HPM et SG-FPM), généralement séparées par électrophorèse sur gel d'acrylamide en présence de sodium dodécyl sulfate (SDS), totalisent une quinzaine de bandes et sont également très polymorphes (figure 19). Les gliadines, protéines monomériques, ainsi que les gluténines, qui sont polymériques, sont accumulées dans des corpuscules protéiques (petites vacuoles d'environ 1 micron de diamètre) qui se désintègrent lors de la maturation du grain. Ces deux familles de protéines, très riches en prolines et glutamines, apportent la réserve en acides aminés nécessaires à la germination de l'embryon. Elles représentent chacune, en moyenne, 40 % des protéines totales du grain qui varient de 9 à 18 % de la matière sèche.



Figure 18. Polymorphisme des gliadines et gluténines (SG-HPM et SG-FPM) de quelques variétés de blé tendre (BRANLARD et *al*, 2001).

II.2.1 Les gliadines

Comme les autres composantes du gluten, les gliadines sont caractérisées par leur insolubilité dans l'eau. Les gliadines représentent de 40 à 50% des protéines de réserve dans la graine de blé (SHEWRY et *al*, 1986). Ce sont des protéines monomères solubles dans l'éthanol 70% dont les ponts disulfures sont intramoléculaires (KASARDA, 1989). L'analyse par électrophorèse a montré que les gliadines forment un groupe de prolamines hautement hétérogène formé de plus de 100 composantes (ANDERSON et *al*, 1997 ; PAYNE, 1987). Leur polymorphisme est si important qu'il sert de moyen d'identification variétale (EVANS et *al*, 1972). L'étude de la composition en gliadines sur 70 variétés a montré qu'elles sont formées de 20% d'alpha, 28% de bêta, 34 % de gamma et 18% d'oméga gliadines (BRANLARD et DARDEVET, 1985). Les oméga gliadines se distinguent des autres familles par leur poids moléculaire (55-75 kDa), une forte teneur en glutamine et en proline et surtout par l'absence de cystéine. Alors que, les alpha ; bêta et gamma-gliadines contiennent moins de glutamine et de proline. Mais elles sont riches en acides aminés soufrés avec des poids moléculaire variant de 30 kDa à 60 kDa. La facilité d'extraction des gliadines est à la source de plusieurs travaux sur leur structure et leur relation avec la qualité de la pâte (MACRICHE et *al*, 1990). Malheureusement, les études sur des combinaisons de sous-unités de gluténines à haut poids moléculaire et de gliadines dans différents cultivars ont révélé une

relative influence des gliadines sur les propriétés rhéologiques de la pâte (BRANLARD et DARDEVET, 1985 ; LAGUDAH *et al*, 1987). De plus, les effets des gliadines sur la qualité de la pâte ont été attribués à l'association de ces dernières avec les gluténines à faible poids moléculaire FPM (PAYNE *et al*, 1987).

II.2.2 Les gluténines

Les gluténines sont des polymères de protéines dont les chaînes polypeptidiques élémentaires, qualifiées de sous-unités de gluténines, sont réunies par des ponts bisulfures intermoléculaires (SHEWRY *et al*, 1995). Leur capacité de se polymériser leur permet d'atteindre un poids moléculaire de plusieurs millions de daltons. En plus de représenter 40 à 50% des protéines de réserve totale de la graine de blé, elles jouent un rôle déterminant dans la qualité de la farine de blé (PAYNE *et al*, 1987 ; WRIGLEY et BIETZ, 1988). Selon leur mobilité dans un gel SDS-PAGE, ces gluténines sont regroupées en deux classes de sous-unités : une plus mobile, regroupe les gluténines à faible poids moléculaire (FPM). L'autre moins mobile, est représentée par des gluténines à haut poids moléculaire (HPM).

II.2.2.1 Les sous unités de gluténines à faible poids moléculaire (FPM)

Les gluténines à FPM sont des sous unités solubles en milieu acide ou dans l'éthanol 70% en présence d'agents réducteurs (PAYNE *et al*, 1987).

Ces prolamines sont riches en acides aminés soufrés, ayant la capacité de se polymériser. Les sous unités de gluténines à FPM constituent un important groupe de polypeptides représentant 60 à 70% des gluténines, impliquées dans les propriétés rhéologiques du gluten dont les poids moléculaires sont compris entre 30 KDa et 75 KDa (MACRITCHIE *et al*, 1990).

La comparaison entre les séquences d'acides aminés des sous-unités de gluténines à FPM a montré la présence d'une séquence consensus subdivisées en deux grands domaines 5 (OKITA *et al*, 1985; CASSIDY et DVORAK, 1991). Le domaine I est situé à l'extrémité N-terminal et contient des motifs répétés, tandis que le domaine II n'en possède pas (Figure 20). La structure du domaine I est conservée chez les autres protéines de réserve du blé, du seigle et de l'orge, ce qui permet de supposer que ce domaine est probablement essentiel à l'adressage des protéines de réserve (GALILI *et al*, 1993). Le domaine II est aussi subdivisé en 3 sous domaines (A, B et C) interrompus par des régions courtes (11, 2, 13 et 14). 11 et 13 sont riches en glutamines et sont spécifiques aux gluténines à FPM (SHEWRY *et al*, 1989).

Il a été déjà montré que les sous unités à FPM possèdent une composition en acide aminé voisinant celles des α et γ -gliadines avec davantage de sérines et moins d'alanine (WEISER *et al*, 1990). Cette similitude se trouve dans les séquences N-terminales (COLOT *et al*, 1989; TAO et KASARDA, 1989), bien que la séquence consensus des gluténines à FPM se distingue par la présence d'une cystéine supplémentaire dans cette région (CASSIDY et DVORAK, 1991). Le nombre et la localisation des cystéines sont essentiels à leur structure et à leur capacité à se polymériser dans la macromolécule du gluten. Les travaux de SHEWRY et TATHAM (1995) sur la détermination des liaisons disulfures ont montré que le groupement SH dans la région N-terminale des gluténines à FPM est impliqué dans les liaisons inter-chaînes. Ce type de liaison permet aux sous-unités de gluténine de se lier entre elles pour former des polymères. La structure secondaire des gluténines FPM est caractérisée par la présence d'hélice bêta dans le domaine répétitif et d'hélice alpha dans le domaine C-terminal, ce qui permet le développement d'une structure tertiaire qui contribue à la fois à l'élasticité et la viscosité du gluten.

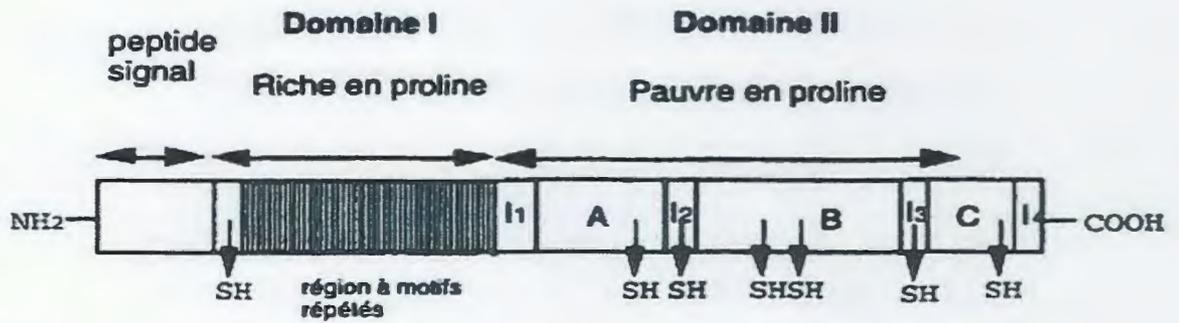


Figure 19. La structure consensus de la région codante des gènes de gluténines à FPM (CASSIDY et DVORAK, 1991).

Bien que les gluténines à FPM constituent de 20 à 30% des protéines de réserve totales de la graine, elles n'ont été que très peu étudiées par rapport aux études extensives des gluténines à HPM (SHEWRY et *al*, 1989 et 1995). Certains travaux antérieurs ont montré l'importance du rôle des sous-unités de gluténines à FPM sur la qualité de la farine (GUPTA et *al*, 1989; AUTRAN et FEILLET, 1987).

II.2.2.2 Les sous-unités de gluténines haut poids moléculaire (HPM)

Plusieurs études ont été rapportées sur la variation des gluténines à HPM et leur contribution à la qualité de la farine (GUPTA et *al*, 1990; MACRITCHIE et *al*, 1990; KLOSTER et *al*, 1991). Précisément, un effet significatif de la variation de leurs allèles sur l'élasticité de la pâte a été rapporté par Payne et *al*, 1984. C'est un groupe qui représente 30 à 40% des gluténines.

En se basant sur la position des sous-unités HPM dans un gel SDS-PAGE Payne et *al*, 1981, ont suggéré leur subdivision en deux sous-groupes. L'un dont les sous-unités de type y qui migrent plus rapidement sur un gel d'électrophorèse de polyacrylamide SDS avec un poids moléculaire variant de 67 à 74 KDa et l'autre dont les sous-unités de type x migrent plus lentement avec un poids moléculaire de 83 à 120 KDa (SHEWRY et *al*, 1984).

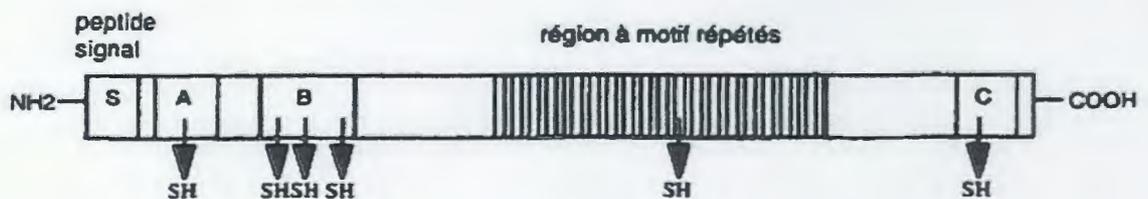


Figure 20. La structure consensus de la région codante des gènes de gluténines à HPM d'après SHEWRY et *al*, 1995.

La structure primaire des sous-unités gluténines à HPM est marquée par des domaines de structure bien déterminés: un domaine non répétitif N-terminal, un domaine central répétitif et un domaine C-terminal non répétitif (figure 21). Le domaine N-terminal possède la quasi-totalité des résidus de cystéine.

Cette différence du nombre de cystéines entre les domaines peut être expliquée par des délétions le long des séquences d'acides aminés des sous-unités de gluténines (SHEWRY et *al*, 1995).

La conformation des SG-HPM est caractérisée surtout par la présence de coudes β - en large proportion (figure 22). En effet, ce sont ces coudes ainsi que les super hélices formées par la succession des hexa et des nanopeptides dans le domaine répétitif qui sont à l'origine de l'élasticité des gluténines (TATHAM et *al*, 1985). Les domaines N-terminaux contiennent quelques structures en hélice $-\alpha$. Selon MAC-RITCHIE, 1999, plus les polymères des gluténines sont longs plus ils se recouvrent et interagissent pour former une matrice continue. La présence des résidus cystéines à leur extrémité est l'élément qui favorise leur polymérisation. Toutes les sous unités ont une seule cystéine dans le domaine C-terminal alors que dans le domaine N-terminal, il existe de 3 à 5 cystéines.

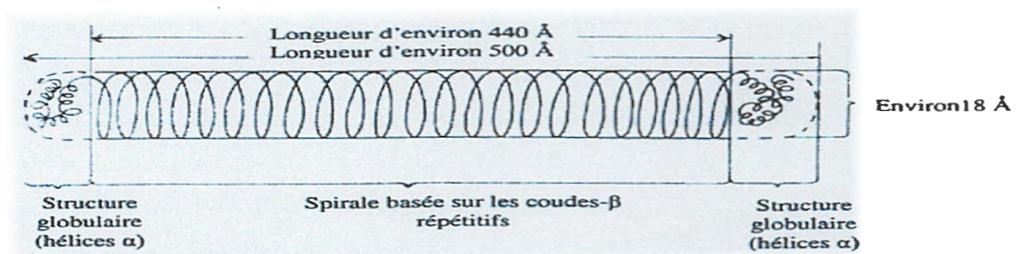


Figure 21. Liaisons disulfures détectées dans le gluten (KLOSTER et *al*, 1991).

II.3 Fonctionnalité des protéines du gluten et leurs interactions dans la pâte en développement

Au cours du pétrissage, la structure tertiaire des agrégats des sous unités gluténines est modifiée. Ils sont étirés et les sous-unités forment des chaînes plus ou moins longues, leur structure secondaire caractérisée par de larges spirales, leur confère des propriétés élastiques (KASARDA, 1989). Ces chaînes sont liées entre elles par des ponts disulfures (stables), des liaisons hydrophobes (moins stables). Ainsi un réseau élastique est constitué. Les gliadines liées aux gluténines par des liaisons hydrophobes, remplissent les espaces entre les gluténines et confèrent au réseau ses propriétés de viscosité. Les liaisons établies au cours du pétrissage peuvent se rompre à la fin de celui-ci, puis éventuellement se former lors du repos de la pâte.

Les sous-unités gluténines et les monomères des gliadines sont très polymorphes : les caractéristiques du réseau établi peuvent donc beaucoup varier de ce fait, plusieurs facteurs ont été proposés pour expliquer ces variations :

- La position et le nombre de sites permettant d'établir des liaisons avec les autres protéines.
- La régularité des spirales (dépendant de celle de la séquence d'acides aminés) qui peut influencer les propriétés d'élasticité (CULOT, 1990).

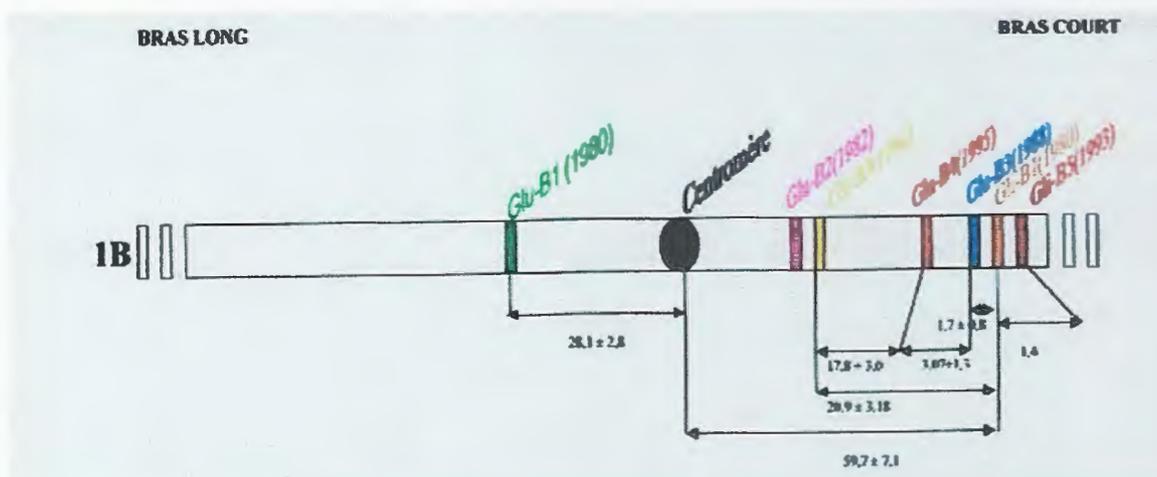
- La taille des chaînes obtenues.
- Le type de liaisons établies (stables ou non), en rapport avec la richesse en soufre des protéines.

Les séquences en acides aminés des principaux types de protéines ont été analysées pour certaines sous-unités et des modèles ont été proposés (KASARDA, 1989).

Le nombre et la position des cystéines (acide aminé contenant du soufre) sont importants : En effet ces acides aminés permettent la formation des liaisons disulfures entre les sous-unités gluténines. (MACRITCHIE *et al*, 1990).

II.3.1 Déterminisme génétique des protéines de réserve

L'analyse génétique de ces protéines est aujourd'hui bien avancée. Ainsi, sur les vingt et une paires de chromosomes du génome du blé tendre, six d'entre elles sont responsables de la synthèse des gliadines et trois de celles des gluténines. Chez le blé tendre (*T. aestivum*), ces protéines sont codées par des gènes situés sur douze principaux locus complexes (car pouvant être formés de plusieurs gènes très liés. Parmi ceux-ci citons ceux qui sont responsables de la synthèse des SG-HPM (*Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1*) (Figure 22).



Distances en centimorgans

Figure 22. Carte de la totalité des loci des gluténines et des gliadines (connus chez le blé tendre et le blé dur), sur le chromosome B du groupe 1. (BRANLARD *et al*, 1992)

Des SG-FPM (*Glu-A3*, *Glu-B3*, *Glu-D3*), des gliadines (*Gli-A1*, *Gli-B1-Gli-D1*) et des β gliadines (*Gli-A2*, *Gli-B2* et *Gli-D2*). À ces douze locus viennent s'ajouter d'autres gènes liés (*Gli-5*, *Gli-6*) ou relativement éloignés (*Gli-3*) (METAKOVSKY EV *et al*, 1996). Sur les chromosomes du groupe 6, le nombre de locus est nettement moins important que dans le cas du groupe 1. Cependant Félix a identifié deux nouveaux locus (*Gli-A7* et *Gli-B7*) à environ 5 cM respectivement des locus *Gli-A2* et *Gli-B2*.

A chacun des locus des gliadines, se trouve un ensemble de gènes étroitement liés, pouvant être identiques ou différents (jusqu'à 12 gènes différents ont été dénombrés), conduisant à autant de protéines transmises en bloc allélique.

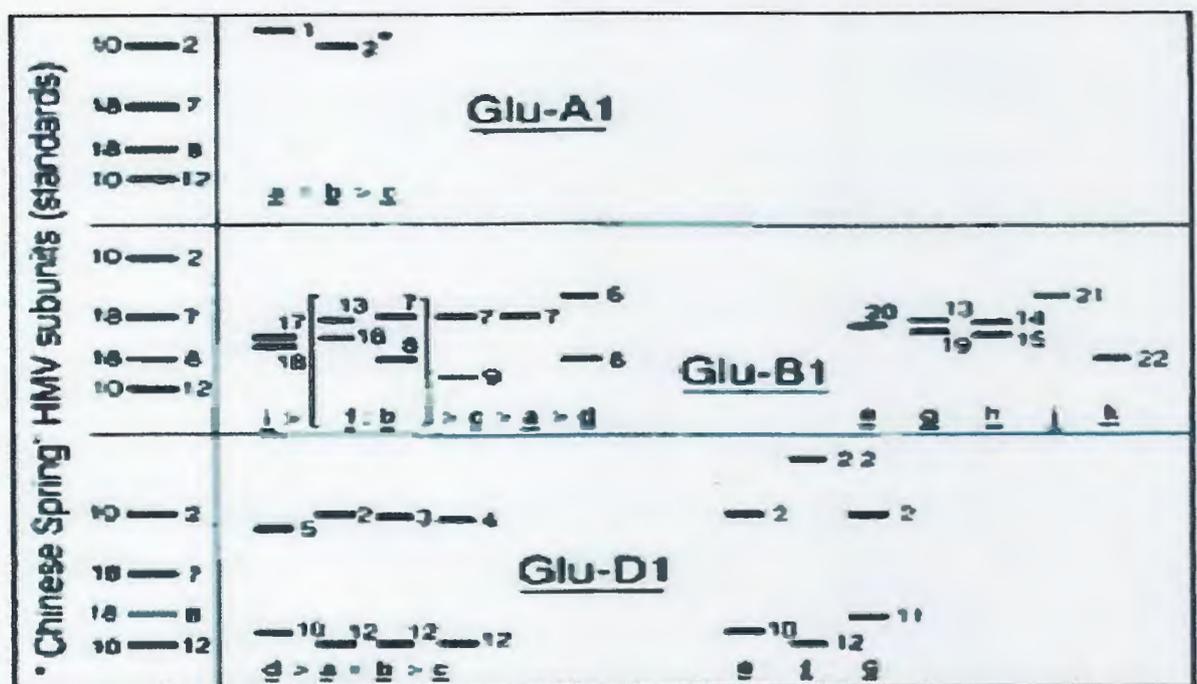
Le nombre de blocs alléliques observés à ce jour par électrophorèse monodimensionnelle des gliadines est au total, pour les six locus (*Gli-1* et *Gli-2*), voisin de 130. Sur un ensemble de 187 blés français, ont été dénombrés respectivement 9, 12, 10, 17, 19 et 12 allèles aux locus *Gli-A1*, *Gli-B1*, *Gli-D1*, *Gli-A2*, *Gli-B2* et *Gli-D2* (BRANLARD et al, 2002).

La diversité allélique des SG-HPM est moindre (environ 40 allèles répertoriés). Les sous-unités FPM des gluténines sont difficilement séparées, en totalité, par électrophorèse monodimensionnelle, de sorte que la quinzaine d'allèles connus est très largement sous estimée (GUPTA et SHEFERD, 1990).

II.3.2 Relation entre composition en SG-HPM et qualité

Les premiers travaux rapportant l'effet de certaines SG-HPM sur la qualité ont été ceux de Payne et al, 1979 et 1981 sur le test de sédimentation SDS. Depuis ces résultats ont été confirmés et complétés aussi bien sur le blé tendre (BRANLARD et DARDEVET, 1985, LAWRENCE et al, 1987, LAGUDAH et al, 1988) que sur le blé dur (AUTRAN et GALTERIO, 1989, et ceci en utilisant différents matériels génétiques (collection, descendance, lignées isogéniques, de substitution, de translocation etc ...)

L'effet des différentes SG-HPM sur la qualité a été résumé par Payne et al, 1984c (Figure 24). D'une manière générale, le locus *Glu-D1* est plus impliqué dans la détermination de la qualité. L'Effet détecté pour les autres locus dépend du matériel végétal étudié. Ainsi suivant l'origine de différentes collections : soit le locus *Glu-A1* a un effet supérieur à celui du locus *Glu-B1* (BRANLARD et DARDEVET, 1985, CARRILLO et al. 1992)



II.3.3 Influence de la diversité des protéines de réserve sur la qualité de la pâte

Depuis une dizaine d'années, on s'est attaché à mettre en évidence les relations entre la présence (ou l'absence) de telle ou telle de ces protéines de réserve de l'albumen et les caractéristiques technologiques des blés. Celles-ci sont souvent appréciées par l'alvéographe Chopin qui permet, par déformation bi-axiale de la pâte soumise à une pression gazeuse, d'obtenir les critères de ténacité (P), d'extensibilité (L), de force (W) et l'indice d'élasticité (Ie). C'est ainsi que certains allèles des SG-HPM se sont révélés significativement associés à une ténacité P élevée, d'autres sont apparus corrélés à une force W importante. Certains ont été reliés à une bonne extensibilité L et, enfin, plusieurs autres de ces allèles des sous-unités HPM des gluténines étaient très fréquemment présents dans les blés de mauvaise qualité (BRANLARD et DARDEVET, 1985). Depuis ces résultats, d'autres analyses conduites sur des descendances en disjonction ont confirmé le rôle important joué par la diversité allélique des sous-unités HPM des gluténines dans l'explication des différentes caractéristiques rhéologiques observées entre blés. La composition allélique des sous-unités gluténines HPM de plusieurs milliers de variétés et cultivars de blé tendre, d'origines très diverses, ainsi que celle de près de cinq cents blés durs (BRANLARD et al, 1989) ont été déterminées et un catalogue a été constitué. Sur la base de ces résultats et aussi grâce aux travaux conduits au Plant Breeding Institute par Payne sur la génétique de ces sous-unités, l'utilisation en sélection a été entreprise en France dès 1983.

L'étude de l'influence de la diversité des SG-FPM et des gliadines sur les paramètres de la qualité du blé tendre a été abordée dès 1987. Les résultats acquis à ce jour permettent d'entrevoir un progrès génétique plus faible que celui apporté par les gluténines HPM. Cependant plusieurs points importants peuvent être dégagés.

* La diversité allélique des gluténines FPM et/ou celle des gliadines contribuent, de manière additive, aux effets apportés par les SG-HPM dans la variation des critères rhéologiques. Cette influence représente généralement moins de 20 % de la variation phénotypique des paramètres (BRANLARD et al, 2002).

* Bien qu'en moyenne la contribution des allèles des locus *Glu 3/Gli 1* soit plus faible que celle des locus *Glu-1*, on peut trouver des allèles ayant des effets très favorables (et d'autres défavorables) sur l'extensibilité et la ténacité de la pâte. De plus, les sélectionneurs français, par l'utilisation des tests de technologie classiques et notamment le recours à la panification lors de l'inscription des blés au Catalogue, ont contribué à accroître la fréquence de certains allèles des locus *Glu-3*, favorables au gonflement du pain. Les sélectionneurs se sont aussi formés à l'analyse des gliadines en vue d'identifier dans les descendances les génotypes possédant la translocation chromosomique. En effet, dans le but d'accroître la résistance à plusieurs maladies fongiques du blé, les sélectionneurs ont eu recours à des géniteurs possédant plusieurs gènes de résistance apportés par un fragment du bras court du chromosome 1R du seigle. La translocation aboutit très souvent à l'élimination d'un fragment du bras court du chromosome 1B du blé portant les gènes des locus *Gli1* et surtout *Glu3* codant pour des protéines participant à la formation du réseau glutineux. Ces variations biochimiques suffisent, généralement, à rendre le blé impanifiable (Figure 24).

Figure 24. Un réseau glutineux insuffisamment viscoélastique et/ou une pâte trop collante aboutissent généralement à l'inaptitude du blé à la panification (BRANLARD *et al*, 2002).



II.3.4 La prédiction de la qualité boulangère

Si nous mettons en évidence une relation entre les caractéristiques électrophorétiques et la valeur boulangère, nous constatons que la sélection des différentes variétés de blé facilite l'appréciation de l'aptitude technologique des génotypes et ce, par simple observation des électrophorogrammes de grains pris individuellement à n'importe quelle génération. La qualité d'un blé est le plus souvent évaluée par rapport à l'utilisation à laquelle il est destiné: panification, biscuiterie, couscous... La qualité est évaluée par rapport à des critères indirects de technologie: force, ténacité, extensibilité, consistance, hydratation.

La qualité technologique d'un blé est liée aux propriétés d'élasticité et d'extensibilité de son gluten. Plusieurs études conduites ont montré que de nombreuses protéines sont déterminantes dans l'explication des propriétés de force, de ténacité et d'extensibilité de la pâte (tableau 6).

Tableau 6. principaux allèles des SG- HPM et des oméga gliadines ayant un effet favorable sur les caractéristiques rhéologiques de la pâte (BRANLARD *et al*, 1992)

locus	Force	ténacité	extensibilité
Glu-A1	b: (2*)		a : (1)
Glu-B1	b: (7-8); (7-9); h (14-15)		f: (13-16); i: (17-18)
Glu-D1	d: (5-10)		b: (3-12)*; a: (2-12)*
Gli-A1			a: (d8-d9-d10); b: (d8-d9)
Gli-B1	d: (d3); e: (d5)		b: (d2-d4-d9')
Gli-D1	a: (d7); c: (nul)		

II.4 Utilisation de l'Electrophorèse des protéines de réserve en amélioration des plantes

L'Electrophorèse des protéines de réserve du grain trouve une application dans l'amélioration des plantes.

II.4.1 L'identification variétale

AUTRAN et BOURDET(1975) utilisent le polymorphisme des gliadines sur gel d'amidon pour dresser une clé de détermination des variétés de blé. BOUSHEK et ZILMAN (1979), AUTRAN (1979) établi une nouvelle clé de détermination sur gel polyacrylamide plus discriminante.

II.4.2 Etudes de la diversité génétique

AUTRAN et BOURDET, 1975 ; BRANLARD, 1980 et AMIOUR, 2002 montrent l'intérêt de l'électrophorèse des protéines de réserve pour apprécier la similarité ou l'éloignement génétique de 2 cultivars.

Roche, 1981 utilise le polymorphisme des gluténines comme marqueur génétique d'un matériel soumis à différents schémas de sélection, afin d'évaluer la variabilité génétique dont dépendra le progrès génétique. VILLEMONT, 1982 étudie les diversités intra-plante, intra-famille d'un matériel en disjonction et les compare à la diversité des parents (figure 25).

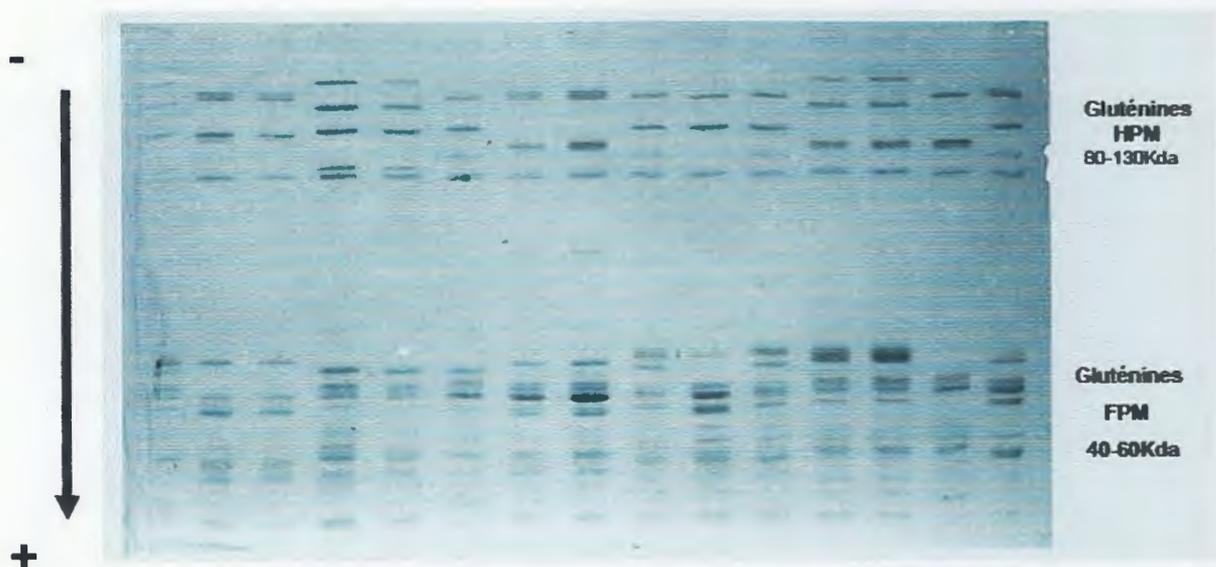


Figure 25. Diagrammes des SG-HPM et SG-FPM révélés par la technique SDS-PAGE de quelques cultivars de blé tendre (BRANLARD et *al*, 1992)

II.5 Extraction et séparation des protéines de réserve

Afin de mieux connaître et identifier les protéines de réserve, plusieurs techniques d'extraction et de séparation ont été employées, ces techniques ont beaucoup évolué depuis l'extraction d'OSBORNE en 1907 basée sur la solubilité permettant ainsi de séparer les gliadines des gluténines, mais il y a toujours des contaminations entre les différentes classes (BRANLARD et *al*, 1992).

Il n'y a pas longtemps, les gluténines étaient séparées des gliadines en effectuant une extraction des protéines totales en présence du détergent SDS, d'agent alkylateur (Tris Hydroxyméthylaminométhane, pH=8), un réducteur le 2-mercaptoéthanol et par les techniques

d'électrophorèse, Les sous unités de gluténines FPM sont séparées des sous unités HPM en utilisant SDS PAGE, et les gliadines sont séparées en utilisant l'ACIDE PAGE.

En 1990, GRAYBOSCH et MORRIS s'inspirant des travaux de BURNOUF et BIETZ, 1989 ont proposé au lieu de l'extraction des protéines totales une extraction séquentielle basée sur l'élimination des gliadines en les solubilisant dans l'éthanol à 70 % et en lavant le culot résiduel par le diméthylsulfoxyde et l'éthanol 70%. Mais la méthode la plus souvent utilisée est celle de Singh et al, 1991 adaptée de la méthode de MARCHYLLO et *al*, 1989, elle consiste à extraire de façon séquentielle les gliadines par du propanol-1 à 50% puis les gluténines (FPM et HPM) par du propanol-1 à 50% additionné d'agents réducteurs et alkylateurs. Les extraits obtenus sont ensuite fractionnés par SDS PAGE pour les gluténines et ACIDE PAGE pour les gliadines (MORREL, 1994). (figure 26).

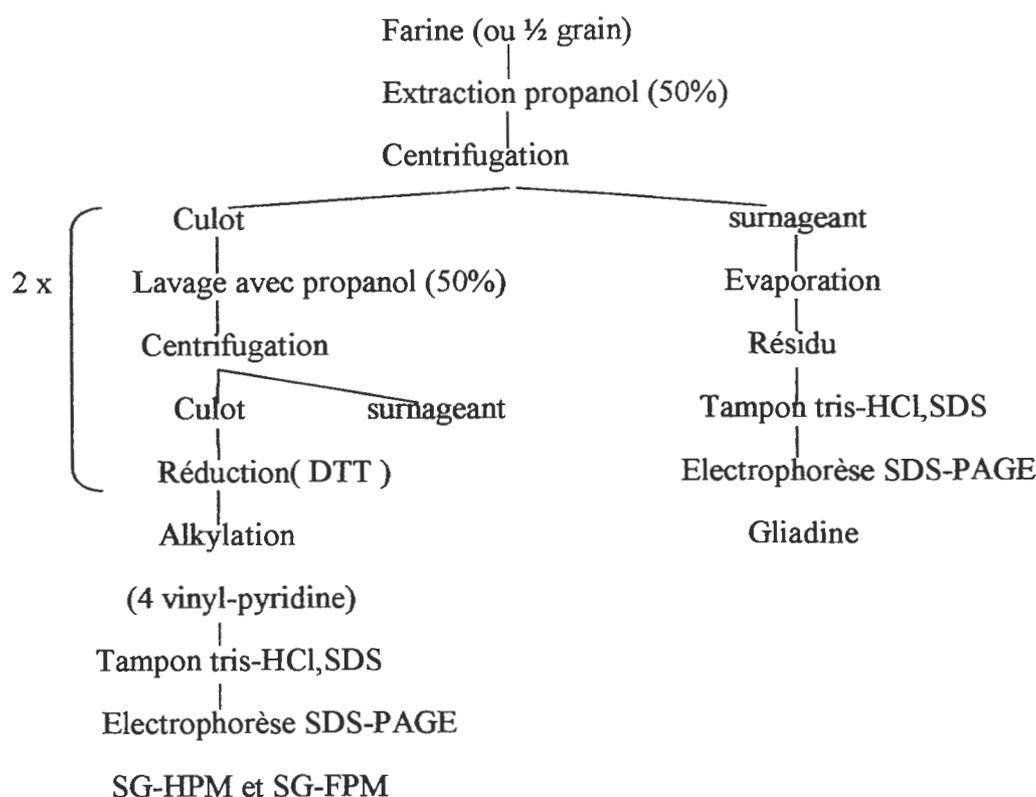


Figure 26. extraction des glutenines et gliadine selon la procédure de SINGH et *al*, 1988

Une autre méthode simple pour extraire les gluténines sans être contaminées par les gliadines, elle se base sur le principe de la précipitation. En effet l'utilisation des concentrations différentes d'acétone (40% et 80% respectivement) après extraction des gliadines selon la méthode de Singh conduit à une précipitation sélective des SG-HPM et des SG-FPM. Cette précipitation est due aux différences de masse entre les deux groupes des protéines (MATZ, 1991).

Les protéines extraites sont ensuite passées à la phase de séparation, pour cet objectif des techniques de haute résolution ont été employées comme la chromatographie (BIETZ, 1986; BEAN et LOOKHART, 1997) et l'électrophorèse (PAYNE et *al*, 1979 ; WIGLEY et *al*, 1982 ; BRANLARD et *al*, 1992). En effet les gluténines sont des polymères qui forment un réseau

pouvant dépasser 10 millions de Da. Avant d'être séparées elles sont réduites par agent réducteur (2-mercaptoéthanol ou dithiothreitol) en sous unités de 25 à 130 KDa., séparées par SDS-PAGE deux groupes se distinguent : les SG-HPM et les SG-FPM. Ces dernières sont surtout lisibles en électrophorèse bidimensionnelle (JACKSON *et al*, 1985).

Les gliadines monomères 24 à 80 KDa sont séparées par électrophorèse en gel acide (ACID PAGE) en quatre classes α -, β -, γ - et ω -gliadines, chaque classe présente plusieurs bandes et donc une grande diversité, ce qui les a laissés comme moyen très efficace pour l'identification variétale. En résumé, l'électrophorèse s'est avérée un moyen efficace d'identification des protéines, en effet les diagrammes obtenus ne sont affectés ni par les conditions de cultures, techniques, lieu, année, ni par la teneur des protéines. C'est un paramètre qualificatif (AUTRAN *et al*, 1973 ; WRIGLEY et SHEPHERD, 1974 ; BUSHUKH et ZILLMA, 1978).

II.6.Électrophorèse des protéines de réserve

Ces techniques électrophorétiques sont basées sur l'analyse de la diversité des protéines de réserve comme moyen d'évaluer les potentialités génétiques de qualité d'un blé.

Les nombreux travaux conduits sur le polymorphisme des protéines du gluten et leur influence sur la valeur d'utilisation (MACRITCHIE *et al*, 1990) ont montré que leur diversité pouvait avoir une part importante dans l'explication des différences variétales de la qualité. Notamment, on sait depuis plus de quinze ans que les sous unités gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM) ont un rôle majeur dans les protéines rhéologique de la pâte. Ces connaissances ont été intégrées au niveau de la sélection des blés et de la même façon peuvent être utilement appliquées par tout laboratoire chargé d'analyser la qualité.

Conclusion

CONCLUSION

Aujourd'hui le blé est la céréale la mieux adaptée et la plus cultivée dans les régions tempérées. La sélection du blé tendre a toujours été orientée vers la qualité boulangère conjuguée à la stabilité du rendement et à la résistance aux maladies.

La teneur en protéines d'un blé ou d'une farine est souvent avancée comme argument majeur de qualité, il vaut mieux avoir des protéines de bonne qualité en quantité suffisante, que des protéines de qualité médiocre en grande quantité.

La qualité est un atout majeur pour répondre aux défis posés par l'intensification de la concurrence. C'est un concept multiforme en évolution continue depuis quelques années pour les productions végétales, notamment pour les céréales comme le blé tendre.

La qualité du blé constitue un critère majeur, c'est la qualité technologique qui est basée sur la corrélation entre la présence des protéines de réserves (le gluten) et des paramètres technologiques.

En effet, le gluten constitué essentiellement par la fraction insoluble des protéines (gluténines et gliadines), présente la caractéristique de pouvoir former un réseau viscoélastique dont les propriétés d'extensibilité, d'élasticité et de ténacité ont une influence sur le comportement des pâtes en cours de fabrication et sur la qualité du produit fini (pain, biscuit, pâte, ...).

Depuis longtemps, les sous unités gluténines de haut poids moléculaire ont fait l'objet d'études intensives, cela est due principalement au rôle qu'elles jouent dans l'amélioration de la qualité technologique du blé. Les progrès effectués au niveau biochimique et génétique ont permis une meilleure caractérisation et compréhension de leur mécanisme. L'un des objectifs des généticiens est d'augmenter le nombre de sous unités gluténines de haut poids moléculaires.

Aujourd'hui il est important tout particulièrement d'établir des ponts entre les différentes descriptions que l'on peut faire des pâtes céréalières. Il doit être possible de recouper les discours des généticiens, des physico-chimistes, des rhéologues et des technologues, afin de faire émerger une représentation de la dynamique de structuration des pâtes, qui transcende les différentes formules de pâtes céréalières.

Comment et jusqu'à quel point peut-on bouleverser la formulation d'un produit céréalier sans dénaturer les caractéristiques texturales ? Faut-il faire évoluer les procédés pour assurer la mise en forme de ces nouveaux types de produits ? faudrait-il changer pour améliorer leur potentiel d'utilisation ?

C'est à ces questions que des travaux sur l'étude des mécanismes de structuration du gluten pourront répondre.

Références

Bibliographiques

Références bibliographique

A

- ❖ ALAIS C., LINDEN G. 1994. Abrégés de biochimie alimentaire, 3^{ème} édition Nancy : Masson : 244 p.
- ❖ AMIOUR N, JAHIER J, TANGUY A.M., CHIRON H ,and BRANLARD G.2002.Effect of(1A) , 1R (1B) and 1R (1D) substitution on technological value of bread wheat. Journal of cereal science.35(2) :149-160.
- ❖ ANDERSON, O.D., LITTS, J.C. & GREENE, F.C. 1997. The ω -gliadin gene family. 1. Characterization of ten new wheat a-gliadin genomic clones, evidence for limited sequence conservation of flanking DNA, and Southern analysis of the gene family. Theor. Appl. Genet. 95:50-58p.
- ❖ AUGER F, MOREL M.-H, DEWILDE M, REDL A. 2009. Mixing history affects gluten protein recovery, purity, and glutenin re-assembly capacity from optimally developed flour-water batters. Journal of cereal Science,doi:10.1016/j.jcs.2009.01.008.
- ❖ AUTRAN JC.1973. L'identification des variétés de blé. Bulltin des anciens élèves de l'école française de meunerie 259 :163
- ❖ AUTRAN J.C & FEILLET , P.1987. Genetic and technological basis of protein quality for durum wheat in pasta, pages 59-71. In: Pattakou, V. (ed.). Agriculture. Protein evaluation in cereals and legumes. Commission of the European Communities

B

- ❖ BECCARI, J.B. 1745. De frumento. De bononiensi scientarium et artium. Instituto atque Acadernia Commentarii, Bologna 2: 122-1 27.
- ❖ BELTON P. S, 1999. On the elasticity of wheat gluten. Cereal. Sci; 19: 131-139.
- ❖ BERGER M. Les lipides du blé tendre II. Composition lipidique de mouture d'essai de huit variétés françaises de blé tendre. Sci. Aliments 1983 ; 3 (2) : 181-187.
- ❖ BÉROT S., CHIRON H., NICOLAS M., GAUTIER S., GODON B., POPINEAU Y. 1996.Pilot scale preparation of wheat gluten protein fractions: II. Technological properties of the fractions. Int. J. Food Sci. Technol; 31 : 77-83.
- ❖ BLOKSMA. AH. ET BUSHUK, W. 1988.Rheology and chemistry of dough. Dans Wheat: chemistry and technology. Volume II. Editeur : Y. Pomeranz. American Association of Cereal Chemists, Inc. St Paul, Minnesota: 13 1-200p.
- ❖ BOUDREAU. A. 1992. Le grain de blé. Dans Le blé, Éléments fondamentaux et transformation. Éditeur : A. Boudreau et G. Ménard. Les Presses de l'Université Laval, Sainte-Foy 1992.-25-50 p .
- ❖ BRANLARD, G. & DARDEVET, M.1985. Diversity of grain protein and bread wheat quality. II. Correlation between high molecular weight subunits of glutenin and flour quality characteristics. J. Cereal Sci. 3:345-354p.
- ❖ BRANLARD G, DARDEVET M, SACCOMANO R, LAGOUTTE F, GOURDON J. 2001. Genetic diversity of wheat storage proteins and bread wheat quality. Euphytica; 119: 57-9

- ❖ BRANLARD G, AUTRAN J C, MONNEVEUX P. 1989. HMW glutenin subunits in durum wheat (*T. durum*). *Theor Applied Genet.* 78: 353-8.
 - ❖ BRANLARD G, KHLIFI D, LOOKHART G. 1992. Identification of some wheat proteins separated by two-step acid polyacrylamide gel electrophoresis and sodium dodecyl sulfate- polyacrylamide gel electrophoresis technique. *Cereal Chemistry*.69:677-678
 - ❖ BRUGGEMAN J., CONTANT Y., DENEWET L. 1996. Travailler au moulin. Association Régionale des Amis des Moulins du Nord Pas de Calais : 199 p.
 - ❖ BUSKUK, W. ET SCANLON, M.G. 1993. Wheat and wheat flours. Dans *Advances in bread technology*. Editeurs : B.S. Kamel et C.E. Stauffer. Blackie Academic & Professional. New York: 1-19p.
- 
- ❖ CALVEL R. 1964. Que sais-je ? Le pain Paris : Presses Universitaires de France : 126 p.
 - ❖ CARENTINO SABINE. 1996. Pains, brioches et gâteaux Bio future : Pains 160, p.38-40
 - ❖ CARILLO J.M, VASQUES J.F, and ORELLANA J. 1992. Identification and mapping of the Gli-3 locus on chromosome 1R of rye (*Secale cereale* L.). *Theoretical and applied Genetics.* 84 :237-241.
 - ❖ CASSIDY B. G. & DVORAK J. 1991. Molecular characterization of a low-molecularweight glutenin cDNA clone from *Triticum durum*. *Theor. Appl. Genet.* 81:653-660.
 - ❖ CASTELLO, P., POTUS, J., BARET, J.L. ET NICOLAS, J. 1999. Effects of mixing conditions and wheat flour dough composition on lipid hydrolysis and oxidation levels in the presence of esogenous lipase. *Cereal Chem.* 76 : 476-482.
 - ❖ CAZALIS R, PULIDO P, AUSSENAC T, PÉREZ-RUIZ J.M.CEJUDO F.J. 2006. Cloning and characterization of three thioredoxin isoforms from wheat showing differential expression in seeds, *J.Exp*:57,2165-2172.
 - ❖ CHEFTEL J.C., CHEFTEL H. 1992. Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments (volume 1) Paris : Tec & Doc – Lavoisier : 381 p.
 - ❖ CHOPIN M, 1973. Cinquante années de recherches relatives aux blés et à leur utilisation industrielle (Boulogne), France.
 - ❖ COLOT V, BARTELS.D, THOMPSON R. & FLAVELL. R. 1989. Molecular characterization of an active wheat LMW glutenin gene and its relation to other wheat and barley prolamin genes. *Mol. Gen. Genet.* 216:81-90.
 - ❖ CORNEC M, POPINEAU Y, LEFEBVRE J. 1994. Characterisation of gluten subfractions by SE-HPLC and dynamic rheological analysis in shear. *J. Cereal Sci*: 19 : 9-131.
 - ❖ COULSON, C.B. & SIM, A.K. 1964. Protein of various species of wheat and closely related genera and their relationship to genetical characteristics. *Nature* 20211 305-1308p

D

- ❖ DENERY PAPINI. S. BRIAND J.P . POPINEAU Y. VAN REGENMORTEL M. 1996. Specificity of antisera raised against synthetic peptides fragments of high Mr glutenin subunits cereal Sci, 23: 133-144.

E

- ❖ EVANS, L.E, SHEBESKI, L.H, MCGINNIS, R.C., BRIGGS, K.G. et ZUZENS, D.1972. Glenlea red spring wheat. Can. J. Plant Sci. 52:1081-1082p.

F

- ❖ FEUILLET, P., GUINET, R., MOREL, M.H. ET ROUAU, X. 1994. La pâte : formation et développement. Dans La panification française. Editeurs : R. Guin et B. Godon. Lavoisier technique et documentation, New York : 226-282 p .
- ❖ FEILLET, P., 2000, Le grain de blé, composition et utilisation, INRA, Paris.
- ❖ FOULD.L , SPRINGER w. 1996. panification - Mémento des technologies agro-alimentaires Paris : Lesaffre/Techno-Nathan : 75 p.

G

- ❖ GALLAIS A. and BANNEROT H.1992. amélioration des espèces végétales cultivées : Objectifs et critères de sélection. (Ed) : INRA : 768p.
- ❖ GALILI G, ALTSCHULER Y.and LEAVANONY H, 1993. Assembly and transport of seed storage proteins. Trend Cell Biol. 3 : 437-443.
- ❖ GODON B. 1981. Le pain Pour la Science, no de décembre, p :74-87
- ❖ GODON B , WLLM C. 1991. Les industries de transformation des céréales Paris : Tec & Doc - Lavoisier: 679 p.
- ❖ GODON B., GUINET R. 1994. La panification française Paris : Tec & Doc – Lavoisier : 521p.
- ❖ GODON B. Le pain. Pour la Science, 1995, dossier hors série de mars (science et gastronomie), p. 16-25
- ❖ GODON B, LOISEL W, 1997. Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. Technique et documentation. Paris. P 661-674
- ❖ GREEN P.H.R., KAMRAN R., MARSH M.N. 2005. Diagnosis of coeliac disease. Best Practice & Research Clinical Gastroenterology: 389-400p.
- ❖ GUPTA R.B., Singh, N.K & Shepherd, K.W. 1989. The cumulative effect of allelic variation in LMW and HMW glutenin subunits on physical dough properties in progeny of two bread wheats. Theor. Appl. Genet. 7757-64.
- ❖ GUPTA R.B, BEKES F. & WRIGLEY, C.W. 1990. Predicting values of LMW glutenin alleles for dough quality of bread wheat, pages 615-620. In: Gluten Proteins, Bushuk W. & R. Tkachuk, (eds.), AACC, St Paul, MN.

J

- ❖ JEUFFROY M.H., 2000. Blé tendre : comprendre et prévoir la teneur en protéines des grains. *Perspectives Agricoles*, 261- 24-31p.

K

- ❖ KANEKO, S., NAGAMINE, T. ET YAMADA, T. 1995. Estimation of endosperm lutein with fatty acids during the storage of wheat seeds. *Biosci. Biotech. Biochem.* 59 : 1-4
- ❖ KASARDA, D.D. 1989. Glutenin structure in relation to wheat quality, pages 277-302, in: *Wheat is unique*. Pomeranz, Y, eds., Am. Assoc. Cereal Chem., St Paul, MN.
- ❖ KLOSTER P, KRECHTING C.F, and VAN GELDER W.M.J., 1991. Quantitative variation in individual high-molecular-weight glutenin subunits of wheat in relation to variation in environmental conditions. *J. Sci. Food. Agric.* 57 : 405-415.

L

- ❖ LAGUDAH, E., MACRITCHIE, F. & HALLORAN, G.M. 1987. Influence of high-molecular weight subunit of glutenin derived from *Aegilops squarrosa* on flour quality. *J. Cereal Sci.* 5:129-138p.
- ❖ LEBAIL M., 1997. Sol, fertilisation et qualité de l'orge de printemps brassicole. *3ème rencontre de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre*. Blois, 18-20 novembre 1997. Gemas -Comifer. 103-112 p.
- ❖ LEBAIL M., 2000. Maîtrise de la qualité des céréales à l'échelle du bassin d'approvisionnement d'une entreprise de collectestockage. Approche agronomique. Thèse de Doctorat INA P-G. 249 p.
- ❖ LEHNINGER, NELSON, COX. 1994. Principes de biochimie (Flammarion), Médecine-Sciences-Flammarion : 99 p.

M

- ❖ MACRITCHIE, F. 1985. Studies of methodology for fractionation and reconstitution of wheat flours. *J. Cereal Sci.* 3:221-230.
- ❖ MACRITCHIE, F., DU GROS, D.L. & WRIGIEY, C.W. 1990. Flour Polypeptides Related to Wheat Quality. Pages 79-133, in: *Advance in Cereal Science and Technology*, Pomeranz, y. (eds.), Am. Assoc. Cereal Chem. St. Paul.
- ❖ MARSAL P. 1999. Développement céréalière et environnement. Directeur de recherche INRA, revue ENA mensuel n° 293, site Internet : www.geoscopie.com/themes/t563cer.html
- ❖ MASY LAITARD. Le pain : aspects biochimiques et nutritionnels Thèse : Pharmacie : Lille, 1989 - 123 p.
- ❖ MATZ, S.A. 1987. *Ingredients for bakers*. Pan-Tech International, Mc Allen, Texas.
- ❖ MATZ, S.A. 1991. *The chemistry and technology of cereals as food and feed*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- ❖ MEYNARD J.M., DAVID G., 1992. Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures. *Cahiers Agriculture.* 1, 9-19p.
- ❖ MILLER, K.A. ET HOSENEY, R.C. 1999. Effect of oxidation on the dynamic rheological properties of wheat flour-water doughs. *Cereal Chem.* 76, 100-104.
- ❖ MISKELIY D.M. 1984. Flour components affecting paste and noodle colour. *J. Sci. Food Agric.* 35 : 363-471.

- ❖ MONNEHAY. N. 1993. Pains de France Projet de 1^{ère} année : IAAL : Lille: 21 p.
- ❖ MOREL M-H, BONICEL J, 1996. New investigations of disulfide bonds of wheat proteins by dithioerythritol (DTE) reduction, proceedings of the 6th international gluten. In *Gluten '96 workshop*, Wrigley C.W.(ed), The Cereal Chemistry Division-Royal Australian Chemical Institute, Melbourne, , Australia, pp257-261.
- ❖ MOSINIAK M., PRAT R., ROLAND J-C. 2002. La paroi primaire de la cellule végétale. Biologie et Multimédia - Université Pierre et Marie Curie - UFR de Biologie. Site internet : www.snv.jussieu.fr.

N

- ❖ NICOLAS, J. ET PONIS, J. 1994. Phénomènes d'oxydation enzymatique et cooxydations. Exemples du rôle de la lipoxygénase en panification et de la polyphénoloxydase en technologie des fruits. *Science des Aliments* 14 : 627-642.

O

- ❖ OKITA T.W, CHESBROUGH V. & REEVES C.D, 1985. Evolution and heterogeneity of alphabeta type and gamma type gliadin DNA sequences. *J. Biol. Chem.* 260:8203-8213.
- ❖ OKITA T.W, CHESBROUGH V. & REEVES C.D, 1985. Evolution and heterogeneity of alphabeta type and gamma type gliadin DNA sequences. *J. Biol. Chem.* 260:8203-8213.
- ❖ OSBORNE, T.B. 1924. *The vegetable proteins*. Longmans, Green. London.
- ❖ OYAMA S. 2005. Boundaries and (Constructive) Interaction, in Neumann-HELD. E. & PARE. L. ET GELINAS, P. 1995. La qualité de la farine de blé panifiable. Première partie. *La Fournée* 49. 16-, 18-20p.

P

- ❖ PAYNE, P.I. & CORFIELD, K.G. 1979. Subunit composition of wheat glutenin proteins, isolated by gel filtration in a dissociating medium. *Planta*. 145:83-88.
- ❖ PAYNE, P.I& CORFIELD, KG. 1987. Genetic of wheat storage proteins and the effect of allelic variation on bread-making quality. *Ann. Rev. Plant. Physiol.* 38:141-153.
- ❖ POPINEAU Y, DENERY-PAPINI S. 1996 Les protéines de réserve du grain de blé. In: *Protéines végétales* Ed : GODON B. Paris : Lavoisier Tech Doc : 120-72.
- ❖ PYLER. E.J. 1988. *Baking science & technology*. Third edition. Sosland Publishing Company. Merriam, cansas.

S

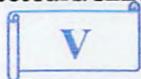
- ❖ SHEWRY, P.R., TATHAM, A.S., FORDE, J., KREIS, M. & MIFLIN , B.J. 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *J. Cereal Sci.* 4:97-106.
- ❖ SHEWRY, P.R., & TATHAM, A S. 1990. The prolamin storage proteins of cereal seeds: structure and evolution. *Biochem. J.* 267:1-12.
- ❖ SHEWRY, P.R., J.A. NAPIER & TATHAM, A.S. 1995. Seed storage proteins: Structure and Biosynthesis. *Plant Cell* 7:945-956.

- ❖ SIMMONDS L ET O'BRIEN H : 1981 Analyse des principaux facteurs impliqués dans le fractionnement combiné de pailles et de sons de blé en extrudeur bi-vis – Obtention d'agro-matériaux. Thèse, INP Toulouse.
- ❖ SINGH N.K ET SHEFRED K.W: 1988.Linkage mapping of genes controlling endosperm storage proteins in wheat, I- Genes on the short arms of group 1 chromosomes.
- ❖ STAUFFER, C.E. 1990. Functional additives for bakery foods. Van Nostrand Reinhold, NewYork
- ❖ STREBEL. K, and SCHNEIDER. N . 1995 .Amtliche Kontrolle von Fleisch, Milch und Eiern auf Chloramphenicol und Sulfadimidin mit adaptierten Enzymimmunoassays, Mitt. Geb.Lebensmittelunters. Hyg. 86, 191 - 212 .
- ❖ SURGET. A, AND BARRON.C. 2005. Histologie du grain de blé, Industrie des céréales n°145, 4-7.



T

- ❖ TOFFALORI N. 1993 . Le pain et la santé Thèse : Pharmacie : Lille : 123 p.
- ❖ TOUSSAIN R. 1999. Céréales et OMC. Directeur de la Production et des Echanges Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, revue ENA mensuel n° 293. site Internet: www.geoscopie.info/managinter/secteurs/s22ceromc.htm



V

- ❖ VALCESCHINI E., HEINTZ W. 1990. La gestion de l'incertitude sur la qualité des blés par les organismes collecteurs et stockeurs de céréales. , in J. Brossier and E. Valceschini. Les exploitations agricoles et leur environnement. Essais sur l'espace technique et économique. INRA, Paris. 5-15p.



W

- ❖ Weiser H. SEILMEIER.W & BELITZ H.D. 1990. Characterization of ethanolextractable reduced subunit of glutenin separated by reverse-phase highperformance liquid chromatography. J. Cereal. Sci. 12:63-71.
- ❖ WRIGLEY. C. W., & BIETZ, J.A. 1988. Proteins and amino acids. Pages 159-275 in: Wheat: Chemistry and Technology, vol. I.3rd ed. Y. Pomeranz (eds.). Am. Assoc. Cereal. Chem., St Paul, MN.



Z

- ❖ ZELENY L. 1947.A simple sedimentation test for estimating the bread-baking and gluten qualities of wheat flour. Cereal Chem., 24: 465-475.

Résumé

Le terme de « qualité » des blés est surtout lié à la valeur boulangère, c'est-à-dire à son aptitude à fournir, à partir de sa farine, un pain bien développé

Les différences variétales de la qualité sont dues en majeure partie au gluten. Les propriétés de ténacité, d'élasticité et d'extensibilité de la pâte, généralement différentes d'une variété à l'autre, résultent des caractéristiques des nombreuses protéines constitutives du gluten, les gluténines sont responsables de la ténacité et de l'élasticité de la pâte et les gliadines de l'extensibilité. La quantité de gluten et la qualité de ces protéines font la valeur boulangère de la farine.

Les principaux apports des techniques électrophorétiques sont utilisés pour la connaissance des protéines et leur utilisation dans la filière blé. Ces techniques sont basées sur l'analyse de la diversité des protéines de réserve comme moyen d'évaluer les potentialités génétiques de qualité d'un blé.

Mots clés : qualité, gluten, gluténines, gliadines, techniques électrophorétiques

Abstract:

The term of "quality" of corns is especially related to the value baker, i.e. with her aptitude required, starting from its flour, a well developed bread

The varietal differences of quality are due in major part to the gluten. The properties of tenacity, elasticity and extensibility of the paste, generally different from one variety to another, result from the characteristics of many proteins constitutive of the gluten, the gluténines are responsible for the tenacity and the elasticity of the paste and the gliadines of extensibility. The quantity of gluten and the quality of these proteins make the value baker of the flour.

Principal contributions of the electrophoretic techniques are: knowledge of proteins and their use in the die corn. These techniques are based on the analysis of the diversity of proteins of reserve like means of evaluating the genetic potentialities of quality of a corn.

Key words: quality, gluten, gluténines, gliadines, electrophoretic techniques

ملخص:

كلمة النوعية للقمح ترتبط خصوصا بالقيمة البيولوجية للخبز، أي كفاءتها لتشكيل خبزا جيدا انطلاقا من هذه الفرينة. يعود السبب الرئيسي للاختلافات المتباينة للنوعية للجلوتين.

خصائص التصلب، الليونة وسهولة الالتواء للعجينة، عموما تختلف من صنف إلى آخر، هذه الاختلافات ناتجة عن مميزات الكثير من البروتينات المكونة للجلوتين، الغلوتينات هي المسؤولة عن التصلب و الليونة للعجينة الغليادينات عن سهولة الالتواء. إن كمية الغلوتين و نوعية هذه البروتينات يكونون القيمة البيولوجية للفرينة الإسهامات الرئيسية لتقنيات الهجرة الكهربائية تتمثل في معرفة البروتينات واستعمالاتها في شعبة القمح.

هذه التقنيات تركز على تحليل مختلف بروتينات التخزين كوسيلة لتقدير الكفاءة الوراثية لنوعية القمح.

الكلمات المفتاحية: النوعية، غلوتين، غلوتينين، غليادين، تقنيات الهجرة الكهربائية