
République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie - El Harrach-Alger
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة - الحراش - الجزائر
Département de Technologie Alimentaire et de Nutrition Humaine

Mémoire

*En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Agronomiques
Option : Sciences Alimentaires*

Thème

**Etudes biochimique et technologique de quelques fractions
de mouture de blé dur :
Relation avec la qualité boulangère.**

Présenté par : M^{me} **TAZEROUT Chahinez**

Soutenu le : 03 /07 / 2013

Jury:

Président : M^r **MEKIMENE L.** Maître de conférences A (E.N.S.A. El Harrach).
Promoteur: M^{me} **OUNANE G.** Professeur (E.N.S.A. El Harrach).
Examineurs : M^{me} **FERHAT Z.** Maître de conférences A (E.N.S.A. El Harrach).
M^r **YESLI A.** Maître-assistant A (Université Tizi Ouzou).

Année universitaire 2012-2013

LISTE DES ABREVIATIONS

AACC: American Association of Cereal Chemists

AFF1: Affaiblissement mesuré au mixographe

AFF2 : Affaiblissement mesuré au farinographe

B.I.P.E.A. : Bureau Interprofessionnel des Etudes Analytiques

CH : Capacité d'hydratation

C.N.E.R.N.A. : Centre National des Etudes et Recherches sur la Nutrition et l'Alimentation

DTT : Dithiothreitol

DD1 : Désagrégateur de tête de mouture 1

DD3 : Désagrégateur de fin de mouture 3

DD4 : Désagrégateur de fin de mouture 4

D16 : Diamètre des particules à 16% de probabilité

D50 : Granulométrie médiane

D84 : Diamètre des particules à 84% de probabilité

ERIAS : Entreprise Régionale des Industries Alimentaires et Dérivés.

FAO: Food and Agriculture Organization

FCG : Farine du cœur du grain

FPG : Farine de la périphérie du grain grain

GH : Gluten humide

GI: Gluténines insolubles

GIx : Gluten index

GS: gluténines solubles

GSc : Gluten sec

GT: Gluténines totales

G:Gonflement

HD : Hauteur de développement de la pâte

HMW-GS: High molecular weight-glutenin subunit

H.P.L.C: High Pressure Liquid Chromatography

IB: Indice de brun

IC : Indice de Chute

Ie: indice d'élasticité

IJ : Indice de jaune

Ins : Insoluble

I.S.O: International Standardisation Organization

I.T.C.F: Institut Technique des Céréales et des Fourrages

ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures.

J.O.R.A : Journal Officiel de la République Algérienne

LMW-GS: Low molecular weight-glutenin subunit

M.A.D.R : Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

MIS : Moulin Industriel de Sebaou

NA : Normes Algériennes

Na I: Iodure de sodium

NF : Norme française

P : Ténacité

P/L : Rapport de configuration ténacité/extensibilité

PM : Protéines monomériques

Pr POL : Protéines polymériques

PT : Protéines totales

L : Extensibilité

r : Coefficient de corrélation linéaire de PEARSON

RI : Résidu insoluble

RP-HPLC: Reversed Phase-High Pressure Liquid Chromatography

S:Surnageant

SDS: Sodium Dodécyl Sulfate

SDS1 : volume de sédimentation avant réduction des échantillons

SDS2 : volume de sédimentation après réduction des échantillons

SE : Semoule Extra

Sg : Ecart type géométrique des particules à 50% de probabilité

SG-FPM : Sous unités de gluténines à faible poids moléculaire

SG-HPM: Sous unités de gluténines à haut poids moléculaire

SIG : Swelling Index of Glutenin (indice de gonflement des gluténines)

3SF (ou SSSF) : Semoule Sassée Super Fine

Stab : Temps de stabilité

TA : Taux d'affleurement

TD1 : Temps de développement de la pâte mesuré au mixographe

TD2 : Temps de développement de la pâte mesuré au farinographe

UB : Unité Brabender

UF : Unité farinographe

UPP : Protéines polymériques inextractibles par le SDS

W : Force boulangère de la pâte

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1: Distribution histologiques des principaux constituants du grain du blé..... | 5 |
| Tableau 2 : Principaux produits formés au cours de la mouture du blé..... | 8 |
| Tableau 3: Exemple de classification des semoules en fonction de la granulométrie..... | 12 |
| Tableau 4 : Spécifications techniques des semoules de blé dur mises à la consommation..... | 13 |
| Tableau 5 : Composition biochimique de la semoule (Résultats exprimés par rapport à une teneur en eau de 14,5 % de ms)..... | 13 |
| Tableau 6: Relation entre les propriétés physiques de la pâte et la valeur boulangère de quelques variétés de blé dur glutens différents..... | 23 |
| Tableau 7: Composition en protéines du grain de blé..... | 27 |
| Tableau 8 : Liste des échantillons étudiés..... | 38 |
| Tableau 9 : Caractéristiques physico-chimiques des grains de blé dur..... | 55 |
| Tableau 10 : Caractéristiques physico-chimiques des produits de mouture du blé dur..... | 60 |
| Tableau 11: Corrélations entre les analyses physico-chimiques des fractions de mouture de blé dur..... | 62 |
| Tableau 12 : Teneur en protéines totales des fractions de mouture du blé dur (g/100g MS)..... | 65 |
| Tableau 13 : Teneurs en protéines des différentes fractions de mouture de blé dur (% protéines totales)..... | 69 |
| Tableau 14: Ratios des fractions protéiques des produits de mouture du blé dur..... | 70 |
| Tableau 15: Caractéristiques technologiques des différentes fractions de mouture étudiées..... | 77 |
| Tableau 16 : résultats des analyses rhéologiques sur les produits de mouture du blé dur..... | 85 |
| Tableau 17: Corrélations entre les paramètres technologiques (coefficient de PEARSON) | 91 |
| Tableau 18 : Corrélations entre les protéines totales et les fractions protéique..... | 93 |
| Tableau 19: Corrélations entre les fractions protéiques et les paramètres technologiques de la pâte..... | 99 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Structure du grain de blé en coupe longitudinale..... | 4 |
| Figure 2 : La mouture du blé dur..... | 7 |
| Figure 3 : Constitution histologique d'un grain de céréale..... | 9 |
| Figure 4 : Différents produits de mouture du blé dur et leur origine histologique dans le grain..... | 10 |
| Figure 5 : Alvéogramme typique d'une farine de blé dur utilisée pour la panification | 22 |
| Figure 6 : Classifications des protéines de la farine | 28 |
| Figure 7 : Procédé de fractionnement séquentiel des protéines..... | 45 |
| Figure 8 : Schéma du test de sédimentation en milieu | 49 |
| Figure 9 : Mixogramme d'un blé dur à gluten fort (Siméto) et ses paramètres | 50 |
| Figure 10 : Courbe alvéographique | 51 |
| Figure 11 : Farinogramme représentatif montrant les indices communément mesurés | 53 |
| Figure 12 : Taux d'affleurement des farines centrales..... | 58 |
| Figure 13 : Taux d'affleurement des farines périphériques..... | 58 |
| Figure 14 : Taux d'affleurement de la 3SF..... | 58 |
| Figure 15 : Taux d'affleurement des semoules..... | 59 |
| Figure 16 : Évolution de la teneur en protéines en fonction de l'origine histologique..... | 64 |
| Figure 17 : Valeurs du gluten index (%) en fonction de l'origine histologique du blé..... | 73 |

LISTE DES ANNEXES

| | |
|--|-----|
| Annexe 1 : Diagramme de mouture du blé dur appliqué au complexe de « MIS »..... | 124 |
| Annexe 2 : Critères de classification des paramètres physico-chimiques et technologiques... | 126 |
| 1 /Echelles de classement des échantillons selon les indices de colorations | 126 |
| 2 /Classement de la force du gluten en fonction du gluten index (GIx) | 126 |
| 3 /Classement de l'activité alpha-amylasique pour la panification | 126 |
| Annexe 3 : Masse de la prise d'essai en fonction de la teneur en eau de l'échantillon pour le farinographe..... | 127 |
| Annexe 4 : Table de correspondance de la quantité d'eau à ajouter en fonction de la teneur en protéines pour le mixographe..... | 128 |
| Annexe 5 : Interprétation des analyses rhéologiques..... | 129 |
| 1 / Classement des blés en fonction des paramètres du mixogramme..... | 129 |
| 2 / Valeurs caractéristiques moyennes des paramètres alvéographiques pour la panification. | 129 |
| 3 /Analyse des paramètres farinographiques en fonction d'une utilisation en panification française (sans présence de produits d'addition)..... | 130 |
| 4 / Interprétation des résultats de l'Alvéographe Chopin selon les réglementations Française et Algérienne..... | 130 |
| Annexe 6 : Teneur en protéines des différentes fractions de mouture de blé dur (%MS)..... | 131 |
| Annexe 7 : Mixogrammes des fractions de mouture du blé dur..... | 132 |
| Annexe 8 : Alvéogrammes des fractions de mouture de blé dur..... | 134 |
| Annexe 9 : Farinogrammes des fractions de mouture du blé dur..... | 137 |
| Annexe 10 : Evolution des rendements et des importations en blé dur durant la période 2010-2012..... | 139 |

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 1 |
| Synthèse bibliographique | |
| I.GENERALITES SUR LE BLE DUR..... | 3 |
| I.1Composition histologique..... | 3 |
| I.1.1 Les enveloppes..... | 3 |
| I.1.2 L’albumen..... | 3 |
| I.1.3 Le germe | 4 |
| I.2 Composition biochimique | 4 |
| II.QUALITE TECHNOLOGIQUE DU BLE DUR..... | 5 |
| II.1 Notion de qualité technologique | 5 |
| II.1.1 La valeur semoulière..... | 6 |
| II.1.2 La valeur pastière..... | 6 |
| II.2 La mouture du blé dur..... | 6 |
| II.2.1Objectif de la mouture..... | 6 |
| II.2.2Principe de la mouture..... | 7 |
| II.3 Les produits de mouture..... | 8 |
| II.4 Caractéristiques des produits de mouture de blé dur | 10 |
| III. SEMOULES ET FARINES DE BLE DUR | 11 |
| III.1 La semoule de blé dur | 11 |
| III.1.1 Classification..... | 12 |
| III.1.2 Composition biochimique..... | 13 |
| III.2 La farine de blé dur..... | 14 |
| III.2.1 Origine..... | 14 |
| III.2.2 Compositions biochimique..... | 14 |
| III.2.3 Caractéristiques physiques..... | 15 |
| III.2.3.1 La granulométrie | 15 |
| III.2.3.2La couleur..... | 16 |
| IV. UTILISATION DU BLE DUR EN PANIFICATION | 16 |
| IV.1 Pain de blé dur..... | 16 |

| | |
|---|----|
| IV.2 Notion de valeur boulangère | 18 |
| IV.3 Appréciation de la valeur boulangère | 18 |
| IV.3.1 Tests directs..... | 18 |
| IV.3.2 Tests indirects..... | 19 |
| IV.4 Caractéristiques technologiques des semoules/farines de blé dur | 21 |
| IV.5 Différences technologiques entre le blé dur et le blé tendre | 24 |
| IV.6 Sélection et amélioration du blé dur | 24 |
| V.LES PROTEINES DU BLE | 26 |
| V.1 Classification et propriété | 26 |
| V.1.2 Les protéines non gluten (solubles)..... | 27 |
| V.1.3 Protéines du gluten..... | 28 |
| V.1.3.1 Les gliadines..... | 29 |
| V.1.3.2 Les gluténines..... | 29 |
| V.2 Contribution des protéines de réserve à la qualité boulangère | 31 |
| V.2.1 Gliadines , Gluténines..... | 32 |
| V.2.2 SG-HPM..... | 34 |
| V.2.3 SG-FPM..... | 34 |
| V.2.4 Ratio gluténine/gliadine..... | 35 |
| V.2.5 Ratio SG-HPM / SG-FPM..... | 36 |
| V.3 FRACTIONNEMENT DES PROTEINES DU BLE | 36 |

Matériel et Méthodes

| | |
|--|----|
| I. MATERIEL VEGETAL | 38 |
| II.METHODES ANALYTIQUES | 39 |
| II.1 Analyses physico-chimiques | 39 |
| II.1.1 Teneur en eau | 39 |
| II.1.2 Teneur en cendres ou matières minérales..... | 39 |
| II.1.3 Analyse granulométrique ou taux d'affleurement..... | 39 |
| II.1.4 Indices de coloration..... | 40 |
| II.1.5 Analyses physiques sur le grain..... | 41 |
| II.1.5.1 Taux de mitadinage..... | 41 |
| II.1.5.2 Poids de 1000 grains..... | 41 |

| | |
|--|-----------|
| II.1.5.3 Moucheture..... | 41 |
| II.2 Analyses biochimiques..... | 42 |
| II.2.1 Teneur en protéines totales..... | 42 |
| II.2.2 Fractionnement par solubilité différentielle et dosage des fractions protéiques..... | 42 |
| II.3 Analyses technologique..... | 46 |
| II.3.1 Dosage du gluten..... | 46 |
| II.3.1.1 Gluten index..... | 46 |
| II.3.2 Détermination de l'indice de chute Hagberg- Petren..... | 47 |
| II.3.3 Indice de sédimentation SDS (Sodium Dodecyl sulfate)..... | 47 |
| II.3.4 Essai au mixographe..... | 50 |
| II.3.5 Essai à l'alvéographe Chopin..... | 52 |
| II.3.6 Essai au farinographe BRABENDER..... | 52 |
| III. ANALYSE STATISTIQUE | 34 |
| Résultats et discussions | |
| I. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES..... | 55 |
| I.1 Sur les grains..... | 55 |
| I.2 Sur les semoules et farines de blé dur..... | 55 |
| I.2.1 Teneur en eau..... | 55 |
| I.2.2 Teneur en cendres | 56 |
| I.2.3 Taux d'affleurement | 57 |
| I.2.4 Indices de coloration | 61 |
| II. ANALYSES BIOCHIMIQUES..... | 63 |
| II.1 Teneur en protéines totales..... | 63 |
| II.2 Fractionnement par solubilité différentielle et dosage des fractions protéiques..... | 68 |
| II.2.1 Protéines monomériques (PM)..... | 66 |
| II.2.2 Gluténines solubles..... | 66 |
| II.2.3 Gluténines insolubles..... | 67 |
| II.2.4 Gluténines totales..... | 67 |
| II.2.5 Résidu insoluble..... | 68 |
| II.2.6 Protéines polymériques..... | 68 |
| II.3 Ratios des fractions protéiques | 68 |

| | |
|--|------------|
| II.3.1 Protéines monomériques/Protéines polymériques..... | 68 |
| II.3.2 SG-FPM/ SG-HPM Ins..... | 68 |
| III. ANALYSES TECHNOLOGIQUES | 71 |
| III.1 Teneur en gluten..... | 71 |
| III.1.1 Gluten humide..... | 71 |
| III.1.2 Gluten sec | 71 |
| III.1.3 Gluten index..... | 72 |
| III.2 Détermination de l'indice de chute HAGBERG PERTEN (IC) | 74 |
| III.3 Indice de sédimentation SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)..... | 75 |
| III.4 Essai au mixographe..... | 78 |
| III.5 Essai à l'alvéographe Chopin | 79 |
| III.6 Essai au farinographe BRABENDER | 83 |
| IV. RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS TESTS D'APPRECIATION DE LA QUALITE EFFECTUES (COEFFICIENT DE CORRELATION DE PEARSON « R »..... | 86 |
| IV.1 Relations entre les résultats des différents tests technologiques..... | 86 |
| IV.1.1 Les paramètres alvéographiques..... | 86 |
| IV.1.2 Les paramètres du mixographe..... | 87 |
| IV.1.3 Les paramètres du farinographe..... | 88 |
| IV.1.4 Caractéristiques du gluten..... | 88 |
| IV.1.5 Les volumes de sédimentation (SDS1 et SDS2)..... | 90 |
| IV.1.6 L'indice de chute IC..... | 90 |
| IV.2 Relations entre les protéines totales et les paramètres technologiques | 92 |
| IV.3 Relations entre les protéines totales et les fractions protéiques..... | 93 |
| IV.4 Relations entre les fractions protéiques et les différents paramètres technologiques de la pâte | 96 |
| CONCLUSION..... | 100 |
| REFERE BIBLIOGRAPHIQUES..... | 103 |
| ANNEXES..... | 124 |

INTRODUCTION

Les céréales constituent la base de l'alimentation humaine et une source non négligeable d'apport protéique et énergétique. La production nationale demeure insuffisante, ce qui contraint le pays à recourir aux importations dont la moyenne a été de 53,2 millions de quintaux pour la période 1999-2009 (FAO, 2009).

Le blé, céréale répandue dans le monde, est consommé sous différentes formes : pâtes alimentaires, couscous, galettes, pâtisserie, et pain. Ce dernier fabriqué surtout à partir de blé tendre (*Triticum aestivum*), peut aussi être obtenu à partir de la semoule ou de la farine de blé dur. Cette pratique est beaucoup plus répandue dans le sud de l'Italie, au Moyen et Proche Orient et dans les pays du Maghreb.

Pour des perspectives économiques, l'étude de l'utilisation des farines de blé dur dans la panification a fait l'objet de plusieurs recherches permettant de valoriser et améliorer la valeur commerciale et technologique du blé dur. En effet, la mouture produit non seulement de la semoule (produit noble) mais engendre aussi une production inévitable de sous produit dénommé la « 3SF » ou farine de blé dur, à des pourcentages non négligeable allant de 7 à 17 % de la production totale.

Il est bien établi que le blé dur présente une mauvaise aptitude à la panification, du fait de sa ténacité et de sa faible élasticité dues à l'absence du génome D (GAZZA *et al.*, 2011) présent dans le blé tendre. Néanmoins, le pain de blé dur a un goût et une saveur agréables, une structure fine et uniforme et une bonne résistance au rassissement (SISSONS, 2008).

Ceci dit, pour l'obtention d'un pain de bonne qualité, la farine/semoule utilisée doit répondre à un certain nombre de critères souvent regroupés sous la notion de « valeur boulangère ». Celle-ci peut être appréciée directement, par un essai de panification ou indirectement, par un ensemble de tests en relation avec la qualité et la quantité des constituants biochimiques en effectuant des analyses rhéologiques (farinographe, alvéographe, mixographe), ou encore durant la fermentation (extensigraphe).

Depuis longtemps, il est admis que la variation de la qualité boulangère est due essentiellement à la quantité et la qualité des protéines du gluten (gluténines et gliadines), mais les nombreux travaux ont montré que ce sont surtout les gluténines qui jouent le rôle clé dans la détermination des caractéristiques technologiques.

Dans ce sens, de larges études ont été conduites et établit des relations positives entre la composition en sous unités de gluténines et la qualité technologique des blés durs, mais pas ou peu d'études ont été effectuées sur les relations entre les teneurs en sous unités de gluténines insolubles SG-HPM et SG-FPM avec la qualité technologique.

Ainsi, en matière de panification, l'acquisition de connaissances scientifiques nouvelles et la mise au point de techniques adaptées au blé dur s'avèrent nécessaires, vu la demande croissante de ce type de pain.

C'est dans ce contexte que s'insère ce travail qui a pour objectif d'étudier les caractéristiques biochimiques (quantification des fractions protéiques) des semoules et des farines de blé dur selon leur provenance histologique d'une part et de déterminer leurs relations avec quelques tests indirects d'appréciation de la valeur boulangère.

A cet effet, nous nous sommes intéressés à :

- déterminer les caractéristiques physico-chimiques des différents produits de mouture de blé dur (humidité, cendres, indices de coloration, granulométrie...).
- suivre l'évolution de la composition biochimique (protéines notamment) des fractions de mouture dans différents solvants.
- déterminer les caractéristiques technologiques et rhéologiques (teneur en gluten, test SDS, mixographe, farinographe alvéographe...) de chaque fraction de mouture.
- établir des relations entre les différents paramètres étudiés.

I. GENERALITES SUR LE BLE DUR

Le blé est une monocotylédone qui appartient au genre *Triticum* de la famille des (*Poaceae*). C'est une céréale dont le grain est un fruit sec et indéhiscent, appelé caryopse, constitué d'une graine et de téguments (FEILLET, 2000).

Le blé dur (*Triticum durum*) est tétraploïde, il contient 28 chromosomes répartis en deux génomes AA et BB (LIU *et al.*, 1995). Il est utilisé pour la fabrication de couscous, la galette, de certains pains traditionnels et des pâtes alimentaires. Il est pastifiable et panifiable (CALVEL 1984).

I.1. Composition histologique

Le grain de blé est formé de trois parties : (figure 1)

I.1.1. Les enveloppes

Occupent 13 à 17 % du poids total de la graine, formées de six tissus différents : épiderme du nucelle, tégument séminal ou testa (enveloppe de la graine), cellules tubulaires, cellules croisées, mésocarpe et épicarpe (FEILLET, 2000).

I.1.2 L'albumen

Représente environs (80 à 85%) du poids du grain (FEILLET, 2000). Il est constitué de :

- l'albumen amylicé qui est formé d'un amas de cellules remplies de granules d'amidon dispersés au milieu d'une matrice protéique et dont les parois celluloses sont peu visibles.
- La texture de l'albumen de blé dur est vitreuse. L'essentiel de l'albumen amylicé se retrouve dans les fractions de semoule après mouture du grain (SURGET et BARRON, 2005).
- la couche à aleurone constituée d'une seule assise de cellules, représente la partie la plus externe. Pendant la mouture, cette fraction est enlevée pour constituer le son.

I.1.3 Le germe

Représente environ 3 % du grain de blé. Il est formé de deux parties principales, l'embryon et le scutellum situé à l'interface avec l'albumen amyliacé (JEANTET *et al.*, 2007). Il contient une proportion élevée de lipides, protéines, vitamines et éléments minéraux.

Le grain de blé possède un sillon résultant d'une invagination des téguments vers l'intérieur du grain, sur toute sa longueur et du côté du germe (EVERS *et* MILLART, 2002).

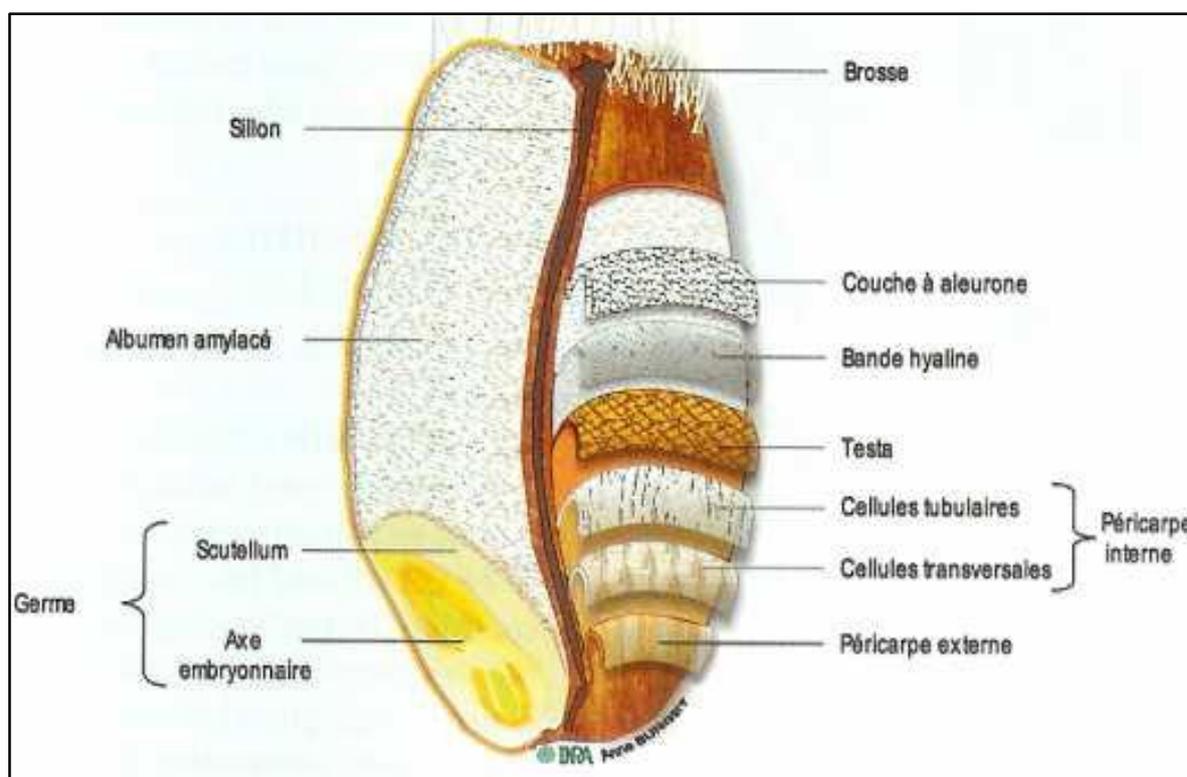


Figure 1 : Structure du grain de blé en coupe longitudinale (SURGET *et* BARRON, 2005).

I.2 Composition biochimique

La composition biochimique du grain de blé est donnée dans le tableau 1. On observe des différences considérables :

- **L'amidon** (environ 70% MS) principal composant glucidique du grain, est exclusivement présent dans l'albumen alors que les enveloppes sont riches en cellulose et pentosanes.

- **Les protéines** (10-15% MS) se trouvent dans tous les tissus, mais essentiellement localisées dans le germe et la couche à aleurone, or cette dernière est en grande partie éliminée lors de la transformation du blé en semoule.
- **La teneur en lipides** du grain est faible, (environ 2 à 3 %MS), mais leur distribution n'est pas uniforme. Les lipides avoisinent ou dépassent les 10% dans le germe et dans la couche à aleurone.
- **La teneur en matières minérales** est d'environ (1,9% MS). Les enveloppes ainsi que la couche à aleurone sont plus riches en matières minérales que l'albumen amylicé (tableau 1).

L'hétérogénéité de la composition biochimique entre les différents tissus constituants du grain de blé va se retrouver dans les produits de mouture et va influencer leur valeur technologique.

Tableau 1: Distribution histologiques des principaux constituants du grain du blé.

| | Grain | Péricarpe (6%) ¹ | | Aleurone (7%) ¹ | | Albumen (84%) ¹ | | Germe (3%) ¹ | |
|--------------------------|-------|-----------------------------|------|----------------------------|------|----------------------------|------|-------------------------|------|
| | % G | % T | % G | % T | % G | % T | % G | % T | % G |
| Protéines | 13.7 | 10 | 4.4 | 30 | 15.3 | 12 | 73.5 | 31 | 6.8 |
| Lipides | 2.7 | 0 | 0 | 9 | 23.6 | 2 | 62.9 | 12 | 13.5 |
| Amidon | 68.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 82 | 100 | 0 | 0 |
| Sucres réducteurs | 2.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.8 | 62.7 | 30 | 37.3 |
| Pentosanes | 7.4 | 43 | 35.5 | 46 | 43.8 | 1.6 | 18.3 | 7 | 2.9 |
| Celluloses | 2.8 | 40 | 87.1 | 3 | 7.6 | 0.1 | 3.1 | 2 | 2.2 |
| Minéraux | 1.9 | 7 | 22.6 | 12 | 43.6 | 0.5 | 22.6 | 6 | 9.7 |

% G= % du constituant dans le grain. % T = % du constituant dans le tissu. ⁽¹⁾ % du tissu dans le grain.

(FEILLET, 2000)

II. QUALITE TECHNOLOGIQUE DU BLE DUR

II.1 Notion de qualité technologique

La qualité d'un blé dur est fonction de l'utilisation que l'on en fait. Or, la presque unique destination du blé dur est l'obtention d'une semoule destinée elle-même à l'obtention de pain ou de galette, de couscous, et surtout de pâtes alimentaires (TRENTESAUX, 1995).

On regroupe sous le terme de « qualité » ou de « valeur industrielle » ou encore de « valeur technologique » l'ensemble des caractéristiques du blé dur qui sont représentées par la valeur semoulière et la valeur pastière.

II.1.1 La valeur semoulière

La valeur semoulière est l'aptitude d'un blé à donner, dans les conditions industrielles, un rendement élevé en semoule de pureté déterminée. Il s'agit donc essentiellement d'une aptitude quantitative limitée toutefois par une notion de pureté de façon à tenir compte du degré de contamination par les parties périphériques du grain. (ABECASSIS, 1993).

La valeur semoulière est fonction des **facteurs extrinsèques** qui sont liés aux conditions de culture et de récolte (impuretés, teneur en eau, mitadinage,...), des **facteurs intrinsèques** : rapport amande/enveloppes, friabilité de l'amande, facilité à séparer l'albumen des enveloppes, taille des grains (LEMPEREUR et *al.*, 1997) qui dépendent essentiellement de la nature et de la variété du blé (ABECASSIS, 1991), et des **facteurs réglementaires** représentés par le taux de cendre : plus ce taux est faible, plus le produit est pur du point de vue réglementaire.

II.1.2 La valeur pastière

Elle regroupe deux notions très distinctes (ABECASSIS et CHAURAND, 1997) :

- D'une part l'aptitude des semoules à être transformées en pâtes alimentaires ;
- D'autre part la qualité organoleptique du produit finis.

La résistance à la rupture et la coloration des pâtes sèches ainsi que leur tenue à la cuisson, sont les principales qualités recherchées pour les pâtes alimentaires.

II.2 La mouture du blé dur

II.2.1 Objectif de la mouture

La première transformation du blé a pour objectif d'isoler l'albumen amylicé sans contamination par les parties périphériques du grain (enveloppes et couches à aleurone) et par le germe (LEMPEREUR et *al.*, 1997) avec un rendement élevé en semoule de pureté déterminée (BARRON et *al.*, 2011).

II.2.2 Principe de la mouture

La nécessité de broyer le grain jointe à la progressivité du procédé, conduit à récupérer l'albumen amylicé non pas intact mais sous forme de fractions de composition histologique différente (HOULIAROPOULOS *et al.*, 1981).

Le procédé de mouture consiste à ouvrir tout d'abord le grain et de récupérer ensuite étape par étape l'albumen amylicé en commençant par extraire les parties les plus internes pour se rapprocher progressivement de la périphérie.

Ce processus implique deux opérations unitaires après nettoyage et conditionnement des grains de blé dur. Une opération de fragmentation-dissociation des grains et une opération de séparation des constituants.

La première étape permet de séparer l'amande des enveloppes « **broyage** », de fractionner les semoules vêtues « **désagrégage** » et de réduire l'amande en semoule par des « **réducteurs** » ; la seconde assure la séparation des sons et des enveloppes sur la base de leur granulométrie (division par tamisage) et de leurs propriétés aérodynamiques en faisant l'épuration des semoules par « **sassage** » (FEILLET, 2000) (figure2).

En semoulerie, la mouture est organisée autour des sasseurs dont sont isolées les semoules purifiées.

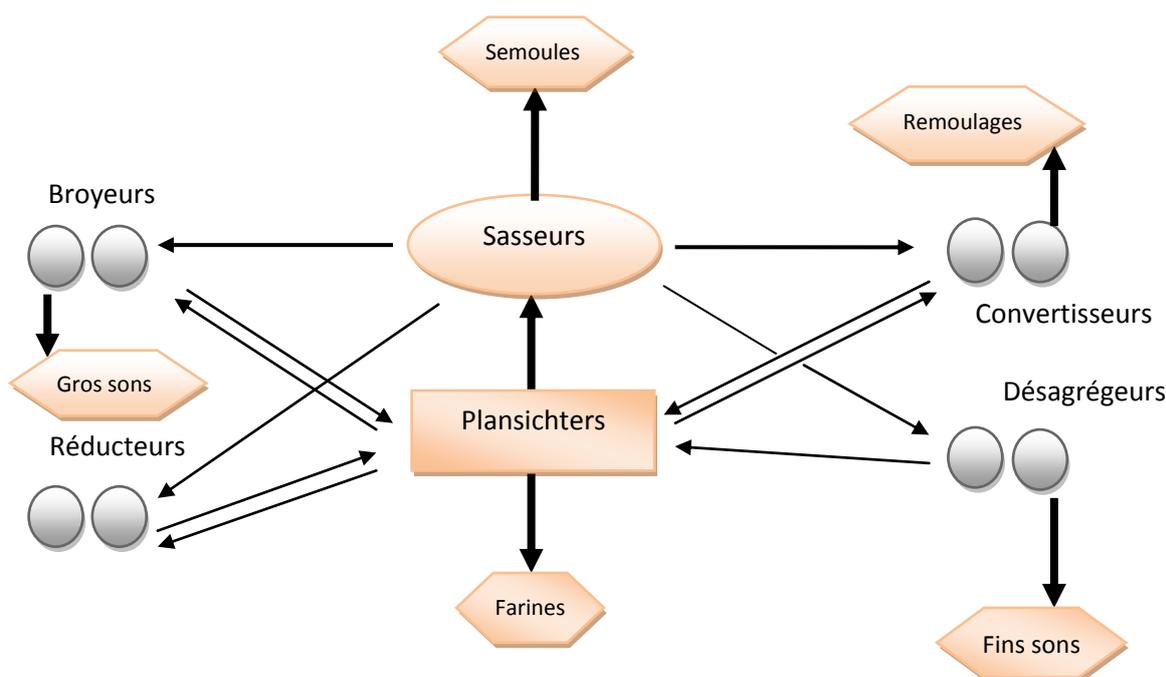


Figure 2 : La mouture du blé dur (FEILLET, 2000).

II.3 Les produits de mouture

A l'issue de la mouture, trois principaux produits sont obtenus (figure 3):

- La semoule : représente le produit noble d'une semoulerie, correspond aux fragments d'amande dont la granulométrie est supérieure à 150µm (FEILLET, 2000) ;
- La semoule super sassée fine (3SF) : la farine de blé dur (grau D) est considérée d'un point de vue réglementaire un sous produit de mouture dont la granulométrie est inférieure à 250 µm (ABECASSIS, 1987) ;
- Les sons : la finesse des enveloppes de blé dur conduit à la formation de sons beaucoup moins larges que ceux de blé tendre. Les sons sont récupérés à la fin de broyage (gros sons) ou à partir des désagrégeurs et parfois des sasseurs (fin sons) (ABECASSIS, 1987).

Le tableau 2 représente les principaux produits formés au cours de la mouture du blé selon FEILLET (2000).

Tableau 2 : Principaux produits formés au cours de la mouture du blé.

| | |
|-----------------------------|---|
| Farines | - Fines particules d'albumen (30 à 200 µm). |
| Semoules | - Grosses particules d'albumen exempts d'enveloppes adhérentes (150 à 500 µm). |
| Gruaux⁽¹⁾ | - Produits isolés du cœur de l'albumen et de taille intermédiaire entre celle des farines et celle des semoules. |
| Semoules bisés | - Grosses particules d'albumen auxquelles adhèrent des fragments d'enveloppe. |
| Remoulages | - Fines particules d'enveloppes auxquelles adhèrent des particules d'albumen. Les remoulages blancs se différencient des remoulages bis par leur teneur plus élevée en produits issus de l'albumen. |
| Fins sons | - Petits morceaux d'enveloppes (0,5-1 mm de dimension principale ; 0.5 à 1 mm ²) exempts d'albumen. |
| Gros sons | - Gros morceaux d'enveloppe (1-5 mm de dimension principale ; 1 à 10 mm ²) exempts d'albumen. |

(1) Qu'il ne faut pas confondre avec les gruaux D, qui sont des farines basses, riches en produits issus de la couche à aleurone, de la mouture du blé dur.

(FEILLET, 2000)

Les rendements en mouture atteignent environ 64% de semoule, 16% de farine « 3SF » et entre 19 et 21% de son.

La correspondance entre les tissus et les différentes fractions technologiques a été schématisée selon GODON et WILLM. (1991) sur la (figure 3) et rapportée sur un grain de blé dur (figure 4) selon FLEURAT-LESSARD et *al.* (2007).

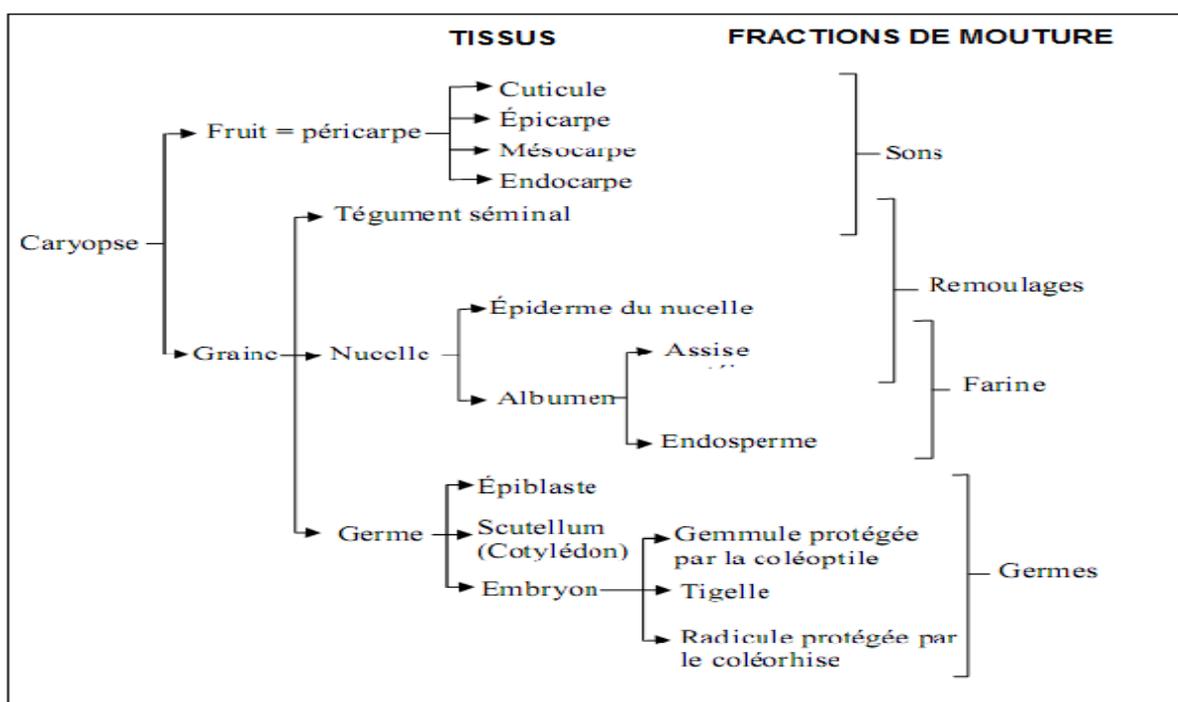
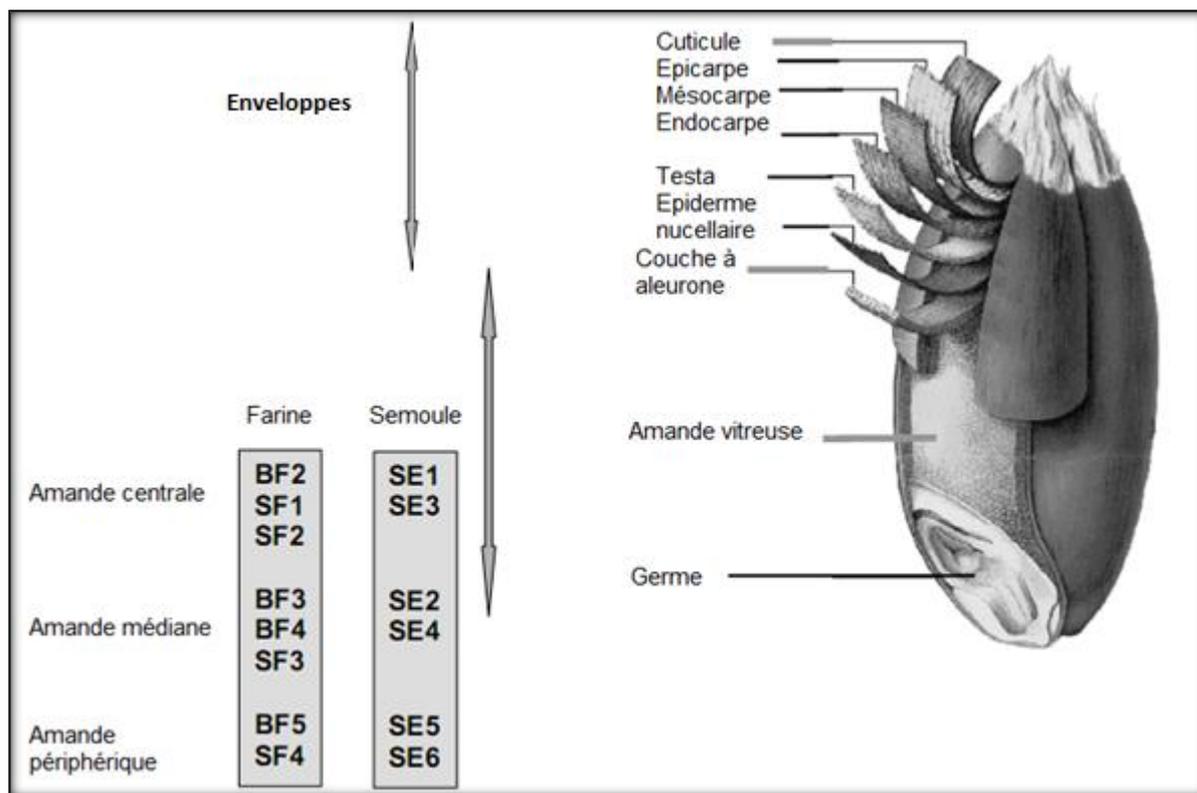


Figure 3: Constitution histologique d'un grain de céréale (GODON et WILLM., 1991).

La farine ou la semoule proviennent pour l'essentiel de l'albumen amylicé, alors que les sons sont constitués de l'ensemble des couches périphériques, y compris la couche à aleurone.

Aujourd'hui, les recherches entreprises visent à mieux valoriser l'ensemble des tissus du grain, et notamment ceux éliminés dans les fractions de type son et remoulage.

Les travaux de PEYRON et *al.* (2002) indiquent que la friabilité de l'amande et la séparabilité entre amande/enveloppes (degré d'adhésion des tissus), sont des facteurs déterminants de la valeur semoulière du blé dur.



BF : farine issue du broyeur. **SF** : farine issue du sasseur. **SE** : semoule issue du sasseur.

(1,2,3,4,5,6) : numéros des broyeurs/sasseurs.

Figure 4: Différents produits de mouture de blé dur et leur origine histologique dans le grain (FLEURAT-LESSARD *et al.*, 2007).

II.4 Caractéristiques des produits de mouture de blé dur

La qualité technologique d'une semoule est définie comme son aptitude à donner des produits finis dont l'aspect et la qualité répondent aux désirs des consommateurs. Ces deux caractéristiques sont influencées par la composition biochimique et l'état physique (granulométrie des semoules), eux-mêmes liés à l'origine histologique du grain de blé.

Plusieurs études ont été entreprises pour préciser la répercussion des différences de composition histologique sur la valeur technologique des différents produits de mouture : (ABECASSIS *et* ALAUSE (1976) *et* HOULIAROPOULOS *et al.* (1981)) sur le blé dur, (FUSTIER (2006) *et* WANG *et al.* (2007)) sur le blé tendre.

Il ressort de ces travaux qu'au niveau de la coloration, c'est principalement sur le brunissement que s'exerce l'influence de l'origine histologique, l'indice de jaune reste une caractéristique essentiellement variétale. L'augmentation du brunissement va conduire à introduire dans les produits finis des particules, issues de la couche à aleurone, riches en peroxydases et en polyphénoloxydases (FEILLET et *al.*, 1974).

Selon BORRELLI et *al.* (2008), les pigments caroténoïdes sont distribués différenciellement dans le grain, leur gradient décroît dans le germe, les enveloppes et l'endosperme.

Par ailleurs, l'augmentation du taux d'extraction provoque un accroissement de la teneur en fibres, en matières minérales et en protéines. La teneur en gluten sec évolue cependant de façon sensiblement différente car on observe une diminution de l'extractibilité du gluten au fur et à mesure de l'avancement de la mouture (ABECASSIS, 1991).

La comparaison des teneurs en protéines montre que celles des farines sont supérieures à celles des semoules (HOULIAROPOULOS et *al.*, 1981). Quant aux propriétés viscoélastiques de la pâte, les farines présentent un gluten ferme et moins élastique que celui des semoules. En outre, cette ténacité augmente régulièrement avec l'avancement de la mouture alors que l'élasticité du gluten varie moins et demeure une caractéristique davantage variétale (ABECASSIS, 1991).

III. SEMOULES ET FARINES DE BLE DUR

La Norme Codex (178-1991) définit la semoule et la farine de blé dur comme étant « les produits obtenus à partir des grains de blé dur (*Triticum durum*, Desf) par procédé de mouture ou de broyage au cours desquels le son et le germe sont essentiellement éliminés, le reste étant broyé à un degré de finesse adéquat. La semoule complète de blé dur est préparée par procédé de broyage similaire, mais le son et une partie du germe sont préservés ».

III.1 La semoule de blé dur

La semoule est un produit granulé issu de la mouture industrielle des grains de blé industriellement purs et nettoyés. Elle est constituée des fragments de l'amande du grain dont la taille granulométrique est supérieure à 150 µm (ABECASSIS, 1998).

III.1.1 Classification

Les différentes semoules commercialisées en Algérie sont classées selon BENBELKACEM (1995) comme suit:

Semoule SE : appelée aussi semoule extra, ses particules sont fines, elle présente une granulométrie dont le refus au tamis 120 est de 90%. Cette semoule est orientée vers la fabrication des pâtes alimentaires industrielles.

Semoule SGM : appelée semoule moyenne, elle présente un refus au tamis (100) de 90%. Cette semoule est généralement vendue en l'état pour l'utilisation ménagère (couscous, galette, biscuits, crêpes, etc.) et pour la fabrication du couscous industriel de type moyen.

Semoule SG : la semoule grosse doit avoir un refus de 50% aux tamis 30 et 40. Cette semoule est destinée essentiellement à la fabrication du couscous type gros.

Les opérations de tamisage sont définies à la fois par des objectifs de production (répartition équilibrée de l'alimentation des appareils à cylindres) et des types de granulométries recherchés (tableau3).

Tableau 3: Exemple de classification des semoules en fonction de la granulométrie.

| | Grosses semoules | | | | Moyennes semoules | | Fines semoules | | Farine | |
|-----------------|------------------|-----|-------------|------------|-------------------|-----|----------------|-----|--------|--------------------------------|
| Tamis | | | | | 42 | 60 | 80 | 100 | 120 | |
| Ouvertures (µm) | 1 150- 1 100 | 900 | 700- 800 | 530 | 350 | 250 | 187 | 161 | 140 | |
| Classes | GG | MG | SSSG | SSSSE-SSSS | SSSE | | | | | |
| Destinations | non sasseés | | sasseés | | | | SSSF | | | |
| | Potage | | Couscous | Potage | pâtes alimentaire | | | | | Gruaux D (pâtes animaux) |

S (sassage), SSS (3passages de sassage), E (extra), F (fine), M(moyenne), G (grosse), gruaux D (gruaux durs). (JEANTET et *al.*, 2007)

Selon la législation algérienne (J.O.R.A, 2007), les semoules de blé dur mises à la consommation sont classées comme suit :

- Semoule courante de blé dur ;
- Semoule extra de blé dur.

Les spécifications techniques des semoules sont rapportées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Spécifications techniques des semoules de blé dur mises à la consommation

| Désignation des produits | Taux de cendres (% ms) | Taux d'acidité (g/100g H ₂ SO ₄) | Taux d'humidité maximum (%) |
|--------------------------|------------------------|---|-----------------------------|
| Semoule courante | 1,3 maximum | 0,08 maximum | 14,5 |
| Semoule extra | 1 maximum | 0,065 maximum | 14,5 |

(J.O.R.A., 2007).

III.1.2 Composition biochimique

Les semoules issues de l'endosperme amylacé (albumen) jouent un rôle déterminant dans la fabrication des produits à base de blé dur.

La composition biochimique de la semoule (tableau 5), dépend du taux d'extraction et revêt une grande importance pour les pastiers qui préfèrent la semoule issue d'un blé dur sain et vitreux, de granulométrie homogène (200 à 400 µm), de couleur uniforme avec un gluten court et résistant et un minimum de piqures (BOUDREAU et MENARD, 1992).

Selon VIERLING (2008), les semoules de blé dur contiennent 12 à 13 % d'eau, au moins 12 % de protéines et moins de 73 % de glucides, principalement sous forme d'amidon. La composition protéique de la semoule est détaillée dans le (chapitre V).

Tableau 5 : Composition biochimique en g pour 100 g de la semoule.

| Composants | Teneur (%) |
|------------------------------|------------|
| Eau | 13,1 |
| Protéines | 9,56-12,6 |
| Amidon | 68,96-70,4 |
| Polysaccharides non amylacés | 3,9 |
| Lipides | 0,79-3,8 |

(FAVIER et *al.*, 1995).

III.2 La farine de blé dur

Les farines de passage proviennent des différentes régions histologiques du grain et se différencient les unes des autres par leur composition chimique, quantitative (teneur en protéines et teneur en gluten) ; et par leurs propriétés physiques (couleur, granulométrie, piqures).

Celles des premiers passages proviennent du cœur de l'albumen et celles isolées en fin de mouture sont beaucoup plus riches en matières minérales que les premières (FEILLET, 2000).

III.2.1 Origine

Dans une semoulerie, il conviendrait de chercher à obtenir une production maximale de semoule, néanmoins, l'action successive des appareils à cylindres entraîne la production de farine (ABECASSIS, 1987).

Selon MIRAD (1985), la production de la farine de blé dur est d'autant plus importante en cas :

- D'un blé fortement mitadiné ;
- D'une mauvaise conduite de la mouture (exp : mauvais réglage des appareils à cylindres)
- De dépassement de la durée optimale du conditionnement ;

Sa provenance est irrégulière, elle peut provenir de l'amande (action de broyeurs) ou d'enveloppes (action brutale des désagrégeurs).

III.2.2 Compositions biochimique

- **L'eau** : la teneur en eau a, à la fois, une importance sur le plan économique, et sur le plan de la conservation de la farine.

La norme Codex (178-1991) exige des teneurs en eau de farine de blé dur qui ne dépassent pas 14,5 % de matière humide.

- **Les matières minérales** : la répartition des matières minérales entre les constituants des différentes parties du grain est sensiblement différente (WILLM et FOURRE, 1998). En effet, l'albumen du blé dur contient environ 50 % de la totalité des matières minérales du grain contre

25 % pour le blé tendre (COLAS, 1997), par conséquent, les produits de mouture issus du blé dur sont plus riches en cendres (ABECASSIS et FEILLET, 1985).

D'après LIU *et al.* (1996), la provenance irrégulière de la farine de blé dur (germe, amande et enveloppes) engendre une présence importante de particules de son, dégradant ainsi sa pureté. La teneur en cendres est beaucoup plus élevée dans les farines de blé dur (1,50 % M.S).

La norme Codex (178-1991) fixe la valeur limite des matières minérales à 1,75% M.S.

- **L'amidon** : représente la principale substance glucidique de réserve (BULEON *et al.*, 1990).

La farine de blé dur présente une teneur en amidon de 72,4 % (M.S), mais contient plus d'amidon endommagé (7 à 15 % M.S) que le blé tendre, et les semoules en contiennent très peu (5 à 6 % M.S).

Le rôle de l'amidon endommagé est très important en panification et pastification, puisque l'absorption d'eau de la pâte est influencée par le pourcentage d'amidon endommagé et montre son importance dans la production de sucres utilisables par la levure au cours de la fermentation (POMERANZ, 1983).

-**Les protéines** : selon POMERANZ (1983), les farines de blé dur contiennent entre 9 % et 15 % (MS) de protéines.

-**L'activité α -amylasique** : l'activité enzymatique des farines de blé dur varie selon la provenance histologique. Elle est maximale dans les enveloppes du grain (péricarpe), faible dans l'albumen et nulle dans le germe (FEILLET, 2000).

L'activité α -amylasique augmente avec le taux d'amidon endommagé (POTUS, 1993).

III.2.3 Caractéristiques physiques

III.2.3.1 La granulométrie

Selon QUAGLIA (1988), La farine de blé dur se caractérise par une granulométrie variant entre 120 et 190 μm , ses particules sont plus rondes que celles du blé tendre (MIRAD, 1985).

LINDHAL et ELIASSON (1992), dans une étude effectuée sur des échantillons de farine de blé dur et de blé tendre, ont montré que la friabilité de l'amande du blé tendre donnait une farine de distribution granulométrique plus fine que celle des farines de blé dur.

III.2.3.2 La couleur

La présence d'une concentration considérable de pigments jaunes (xanthophylles) dans le blé dur confère aux farines une coloration allant de jaune ambré à foncé (BOYACIOGLU et DAPPOLONIA, 1994a).

LAIGNELET *et al.* (1972) ont signalé l'influence de la composition chimique et des conditions de culture sur la coloration apparente des farines mais également celle du taux d'extraction qui conduit à l'apparition d'une couleur sombre suite à une contamination par les parties périphériques.

IV. UTILISATION DU BLE DUR EN PANIFICATION

IV.1 Pain de blé dur

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) est l'une des denrées alimentaires la plus largement cultivée dans la région méditerranéenne. Il constitue la source principale de la semoule pour la production des pâtes, couscous, burghul (RAFFIO *et al.*, 2003), mais aussi de certains types de pains dans certaines régions méditerranéennes, Moyen-Orient (QUAGLIA, 1988) et d'Afrique du Nord (ELIAS, 1995 ; TROCCOLI *et al.*, 2000 ; OZDEREN *et al.*, 2008).

La farine de blé dur utilisée pour la fabrication du pain peut être obtenue soit par réduction de la semoule, soit issue des différents passages de la mouture du blé dur (SISSONS, 2008).

Plusieurs études relatives à l'utilisation du blé dur en panification ont été faites (DEXTER *et al.*, 1981 ; QUICK et CRAWFORD, 1983 ; JOSEPHIDES *et al.*, 1987 ; LOPEZ-AHUMADA *et al.*, 1991 ; BOYACIOGLU et D'APPOLONIA, 1994b ; PENA *et al.*, 1994 ; DEXTER *et al.*, 1994 ; BOGGGINI *et al.* 1995a,b ; HARELAND et PUHR, 1999).

La plupart de ces études ont rapporté que le blé dur donnait des pains de faible volume et de mauvaises performances à la cuisson. L'amélioration de cette dernière peut se faire en réalisant des mélanges entre blé dur et blé tendre (DEXTER et MARCHYLO, 2000).

Par ailleurs, d'autres travaux ont montré l'existence de génotypes de blé dur qui permettent d'avoir des pains égaux en volume et en texture de la mie à ceux du blé tendre (BOGGINI et POGNA, 1989; EDWARDS *et al.*, 2007 ; SAPIRSTEIN *et al.*, 2007). En effet, ces derniers ont montré qu'un temps de fermentation court permettait d'avoir un bon volume de pain aux génotypes de blé dur possédant un gluten fort.

Selon ABECASSIS (1996), malgré la diversité des formes et des modes de préparation et suivant les habitudes alimentaires de chaque région, le pain de blé dur est devenu l'objet de nombreuses études scientifiques qui visent en priorité à minimiser ses inconvénients et exploiter au maximum ses avantages.

- Parmi ses avantages, le pain de blé dur présente un goût, une couleur et une odeur très agréables, une mie avec une structure fine et uniforme, ainsi qu'une meilleure résistance au rassissement (LIU *et al.*, 1996 ; CHIAVARO *et al.*, 2008). Cette dernière est probablement due à une meilleure capacité de rétention d'eau de la farine de blé dur (BOYACIOGLU et D'APPOLONIA, 1994b).
- Quant aux inconvénients, ils sont principalement liés à la forte ténacité et au manque d'extensibilité du gluten de blé dur qui lui confèrent une moindre capacité à donner des pâtes levées (AMMAR *et al.*, 2000 ; EDWARDS *et al.*, 2001 ; RAO *et al.*, 2001).

Aussi, la mouture du blé dur produit une farine avec une granulométrie plus fine et augmente l'endommagement de l'amidon, donnant un pain avec une mie moins cuite et une croûte foncée (DEXTER *et al.*, 1994b ; SAPIRSTEIN *et al.*, 2007).

Dans la plupart des cas, ces pains ne sont pas produits industriellement mais de manière artisanale, ce qui explique leur coût élevé (SISSONS, 2008).

En Italie et au Canada, l'amélioration du blé dur adapté à la fois pour le pain et les pâtes a un double objectif (SISSONS, 2008), il peut être utilisé à la place du blé tendre ou mélangé à des farines (BOGGINI et POGNA, 1989).

TORBICA *et al.* (2011) ont trouvé que l'ajout de la farine de blé dur améliore la qualité des blés tendres de faible valeur boulangère et ceux attaqués par les insectes. Ces derniers déprécient la qualité des protéines notamment le complexe du gluten. Pour cela, un mélange 50% de farine

de blé dur à une farine de blé tendre de faible force (6% du grain endommagé par les punaises des céréales) a permis de produire un pain de bonne qualité sensorielle.

Les résultats de LAMPIGNANO et *al.* (2013) montrent que l'augmentation de la dose de levure permet d'élargir les pores de la mie en améliorant sa microstructure et aussi de diminuer la force et la ténacité de la pâte de blé dur.

IV.2 Notion de valeur boulangère

La valeur boulangère d'une farine est représentée par ses aptitudes à donner du beau et bon pain, dans des conditions matérielles de travail et de rendement compatibles avec une panification normale (CALVEL, 1973).

Deux groupes de facteurs l'influencent:

- la force qui résulte des propriétés physiques de la pâte, globalement conditionnée par les caractéristiques du gluten, sa quantité et surtout sa qualité,
- les qualités fermentatives ; elles dépendent de la quantité des sucres préexistants dans la farine et surtout d'un pouvoir diastasique approprié.

IV.3 Appréciation de la valeur boulangère

Afin d'apprécier la valeur boulangère des farines /semoules de blé dur, il est nécessaire de pratiquer parallèlement des essais visant à apprécier la valeur d'utilisation de la farine/semoule pour la fabrication d'un produit.

Pour cela, il existe soit des analyses directes, correspondant à la mise en œuvre de protocoles de fabrication, soit des analyses indirectes d'appréciation de la qualité (analyses chimiques, rhéologiques...).

IV.3.1 Tests directs

La détermination de la valeur technologique suppose la mise en œuvre d'un protocole normalisé d'un test de fabrication à échelle réduite. En France, celle-ci est appréciée pour le pain courant français par la méthodologie de type CNERNA et la méthodologie BIPEA.

Un essai de panification permet d'apprécier l'aptitude d'une farine à sa transformation en pain de bonne qualité. Il s'appuie sur une procédure de panification soigneusement standardisée et sur une grille de notation de l'évolution des propriétés de la pâte au cours du pétrissage, du façonnage, de l'apprêt et de la mise au four, puis de la qualité de la mie et de la croûte (FEILLET, 2000).

Selon ROUSSEL (1984) le test de panification reste le moyen le plus fiable pour apprécier la valeur boulangère d'un blé donné car il permet d'apporter un jugement à la fois sur la pâte et le pain.

IV.3.2 Tests indirects

Les analyses indirectes présentent un intérêt par rapport à l'analyse directe représentée par l'essai de panification. On peut citer par exemple la rapidité, la répétabilité, le coût et la reproductibilité.

De nombreuses méthodes ont été développées pour mesurer la force du gluten. Entre autres, le « gluten index » (CUBADDA et *al.*, 1992), mais il reste insuffisant et doit être complété par d'autres méthodes telles employées dans la détermination des caractéristiques physiques de la pâte de farine de blé tendre, comme le farinographe, le mixographe et l'alvéographe qui ont été adaptées pour déterminer la force des pâtes issues des semoules de blé dur (IRVINE et *al.* 1961 ;QUICK et DONNELLY 1980 ; WALLE et TRENTESAUX 1980).

-Le test à l'alvéographe de Chopin permet de déterminer la force boulangère d'une farine.

La connaissance des valeurs alvéographiques des farines/semoules permet de réaliser des mélanges convenables de blé pour obtenir la farine boulangère souhaitée.

-Le test au farinographe permet de déterminer la faculté d'hydratation d'une farine et donc la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance donnée. Il est réalisé par un pétrin enregistreur.

-Le test au mixographe Ce test permet de déterminer quelques propriétés importantes de la pastification et de la panification des cultivars de blé dur en mettant en évidence en particulier la force du gluten.

-L'indice de chute de Hagberg correspond au temps que met une masse mobile pour traverser un empois d'amidon formé avec la farine testée. Le temps de chute dépend de la liquéfaction de l'empois d'amidon par les α - amylases de la farine.

-Le gluten index est une alternative simple, acceptable pour examiner la force du gluten des blés durs, meilleur que la teneur en protéines, la teneur en gluten sec et humide et semblable au test de sédimentation (CUBADDA *et al.*, 1992).

Le gluten index peut être employé comme un test prédictif et rapide de la qualité pastière et de la qualité boulangère des blés durs (RANHOTRA *et al.*, 1992).

-Le test SDS : Le test de sédimentation en milieu S.D.S. mis au point par AXFORD *et al.* (1978) sur le blé tendre puis modifié en (1979) a donné des corrélations positives avec le volume du pain. Il a ensuite connu des modifications par PRESTON *et al.* (1982) et DICK et QUICK (1983) sur le blé dur.

Ce test a permis d'avoir des corrélations positives avec le volume du pain (PENA, 2000).

-Le test SIG (Swelling Index of Gluténin) ou indice de gonflement des gluténines, mis au point par WANG et KOVACS (2002 a,b) a montré de bonnes corrélations avec les paramètres de force de la pâte d'où son utilité dans l'appréciation de la qualité boulangère des farines et l'appréciation de la qualité du gluten de blé dur (WANG et KOVACS, 2002c).

Les tests indirects ont contribué largement à la détermination de la valeur boulangère. En effet, de nombreux résultats ont été rapportés :

BOGGINI et POGNA, (1989), PENA *et al.* (1994) et DEXTER *et al.* (1998) indiquent une forte relation entre le volume du pain et la force boulangère.

BOGGINI *et al.* (1995b) et PENA (2000) ont trouvé des corrélations négatives entre le volume du pain et le rapport de configuration P/L mesuré à l'alvéographe.

PENA (2000) observe des corrélations positives entre le volume du pain et la force du gluten avec les paramètres qualitatifs suivants: le test SDS, le mixographe (à l'exception de la hauteur de développement et l'épaisseur au pic maximum) et le gluten index. Il conclue ainsi que le test SDS et le gluten index sont de bons indicateurs de la qualité boulangère du blé dur.

AMMAR *et al.* (2000), EDWARDS *et al.* (2001) et RAO *et al.* (2001) suggèrent que la force du gluten et son extensibilité sont des paramètres importants dans la détermination de la qualité boulangère du blé dur. AMMAR *et al.* (2000) constatent que le volume du pain est corrélé positivement au test SDS et à la hauteur de développement au mixographe.

Les travaux de SAPIRSTEIN *et al.* (2007) ont abouti à l'existence de relations entre les propriétés technologiques et la force du gluten de blé dur par le biais des paramètres suivants : W alvéographique, temps de développement au mixographe et au farinographe et le volume du pain.

Dans leurs études, RAO *et al.* (2010), ont trouvé des corrélations négatives entre la ténacité et l'extensibilité de la pâte et des corrélations positives entre l'extensibilité et le volume du pain. Ils confirment que plus l'extensibilité augmente, meilleur est le volume du pain de blé dur. Ainsi, le rapport P/L est corrélé négativement avec le volume du pain et l'extensibilité de la pâte.

Les différents tests indirects d'appréciation de la qualité technologique des fractions de mouture de blé dur dépendent principalement de la qualité et de la quantité des protéines notamment celles du gluten (gliadines et gluténines). Avant d'aborder la classification et le rôle des fractions protéiques dans la détermination de la qualité technologique, un aperçu bibliographique sur les caractéristiques technologiques des semoules et farines de blé dur est présenté.

IV.4 Caractéristiques technologiques des semoules/farines de blé dur

L'alvéogramme typique du blé dur (figure 5) indique une ténacité très élevée (P) par rapport à l'élasticité (L). En conséquence, le ratio P / L est $> 1,5$ (QUAGLIA, 1988). Cet auteur a constaté que pour fabriquer du pain à partir de blé dur, la semoule ou la farine doit avoir une granulométrie comprise entre 120-190 μm , un pourcentage en amidon endommagé ne dépassant pas 7 – 7,5%, une teneur en protéines $> 13\%$ (MS), une bonne qualité de gluten (P / L alvéographique $> 1,5$, énergie W avoisinant $\approx 200 \text{ J} \times 10^{-4}$).

La stabilité de la pâte est importante pour que la pâte atteigne son temps de fermentation optimale. Ce degré de tolérance peut être jugé par le degré de ramollissement obtenu à partir de l'analyse au farinographe. En raison de leur forte ténacité et la teneur en gluten, la fermentation et le développement du volume du pain sont limités (QUAGLIA, 1988).

Le blé dur se développant dans un climat chaud et sec présente généralement une activité amylasique faible, se traduisant par un indice de chute élevée (460-660) rendant difficile le développement correct de la pâte et peut produire un pain dense (QUAGLIA, 1988).

En panification, cette activité doit être corrigée par l'ajout de farine de malt, d' α -amylase, ou en effectuant des mélanges avec des farines ayant une forte activité amylasique (JOSEPHIDES, 1996), mais en raison de l'hydratation inégale, cela peut provoquer une différence dans l'absorption d'eau et le taux d'hydratation des deux farines, ce qui affecte la qualité du pain (QUAGLIA 1988).

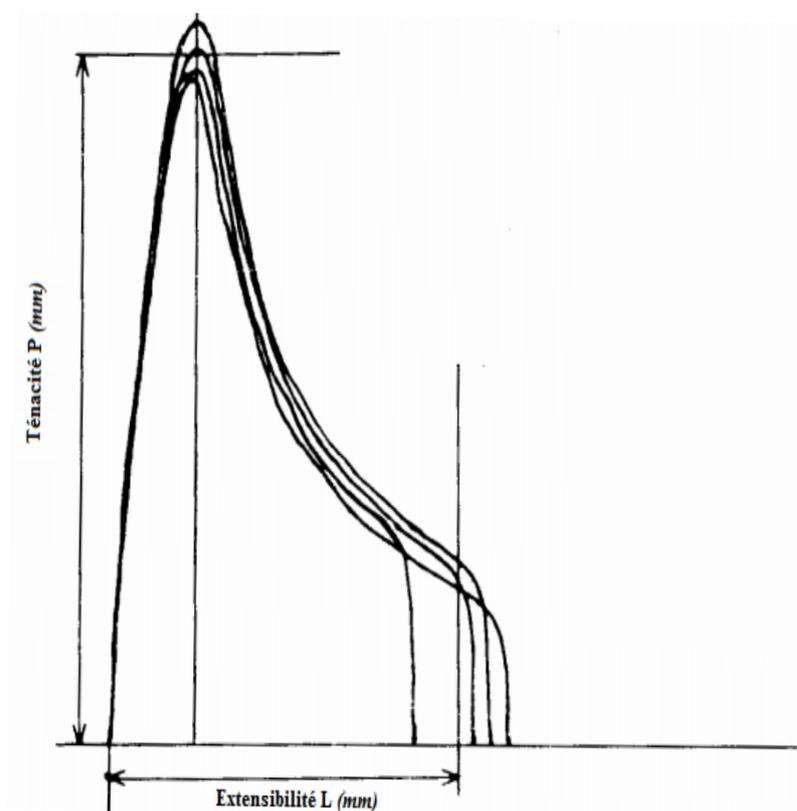


Figure 5 : Alvéogramme typique d'une farine de blé dur utilisée pour la panification (QUAGLIA, 1988).

Pour la fabrication du pain, le gluten doit assurer l'extensibilité et l'élasticité de la pâte pour retenir le CO_2 formé lors de la fermentation et la cuisson (LIU et *al.*, 1996). Quant à la pastification, il doit être tenace pour retenir les granules d'amidon gélatinisés durant la cuisson des pâtes et ainsi, l'absorption d'eau de la pâte utilisée pour la pastification varie entre 31 et 35% comparée à la pâte à pain qui atteint 60% (LUI et *al.*, 1996).

Le tableau 6 donné par RAO et *al.* (2001) met en évidence la relation entre les propriétés physiques de la pâte et la valeur boulangère de quelques variétés de blé dur en fonction de la force du gluten. Les résultats de ce tableau permettent de constater qu'un gluten fort présente une stabilité et un temps de développement au farinographe et au mixographe plus long, un W alvéographique plus grand, mais moins élevé que celui des blés tendres de force (AMMAR et *al.*, 2000) avec une faible extensibilité se traduisant par un rapport ténacité/ extensibilité (P/L) élevé (RAO et *al.*, 2001), ce qui confirme les observations de QUAGLIA (1988). REDAELLI et *al.* (1997) expliquent ce défaut par l'absence du chromosome D1 codant les protéines responsables de l'élasticité et l'extensibilité de la pâte.

Tableau 6: Relation entre les propriétés physiques de la pâte et la valeur boulangère de quelques variétés de blé dur de glutens différents.

| Propriétés | Fort | | Moyen | | Faible | Très faible |
|-------------------------------------|------------|-----------|-------|---------|---------|-------------|
| Mixographe | Pathfinder | Navigator | Morse | Avelona | Wascana | Stewart |
| Absorption (%) | 58 | 58 | 56 | 56 | 54 | 54 |
| Tps. Dévelop. (mn) | 4,5 | 5,2 | 4 | 4,3 | 3,3 | 2,3 |
| Work input (WI) | 194 | 196 | 140 | 142 | 117 | 80 |
| Farinographe | | | | | | |
| Absorption (%) | 57,8 | 57,9 | 55,7 | 55,4 | 55 | 55 |
| Tps. Develop. (mn) | 4,25 | 4 | 3,5 | 3 | 3,75 | 2 |
| Stabilité (mn) | 8,5 | 8 | 4,25 | 3,75 | 2,25 | 2 |
| Extensigraph | | | | | | |
| R max/E, (BU/mn) | 4 | 4,3 | 2,2 | 2,1 | 1,3 | 0,6 |
| Superficie (cm ²) | 190 | 170 | 105 | 100 | 55 | 20 |
| Micro panification | | | | | | |
| Vol. pain (cm ³) | 875 | 820 | 830 | 795 | 760 | 680 |
| Vol.pain cm ³ /proteins) | 74 | 68 | 69 | 62 | 57 | |

(RAO et *al.*, 2001).

La faiblesse de la force alvéographique (W) dans le cas des pâtes de blé dur comparée au blé tendre, peut être expliquée selon SOUTHAN et MC RITCHIE (1999) par :

- Un pourcentage en SG-HPM faible (absence de génome D) responsables des liaisons intermoléculaires S-S.
- La présence de SG-FPM plus importante dans le blé dur formant des polymères linéaires.
- Une longueur des séquences répétées dans les SG-FPM plus courte que celle des SG-HPM.

Une augmentation du nombre de gènes SG-HPM accroît le taux des polymères gluténiques, et par conséquent améliore la force de la pâte (SISSONS *et al.*, 2007).

IV.5 Différences technologiques entre le blé dur et le blé tendre

La semoule/farine de blé dur ont généralement une teneur plus élevée en protéines et en glutens humide et sec que le blé tendre, mais un volume de sédimentation (SDS) inférieur ; par conséquent, la force du gluten de blé dur a tendance à être beaucoup plus faible (FINNEY *et al.*, 1987 ; DICK et MATSUO, 1988 ; BOYACIOGLU et D'APPOLONIA, 1994b).

Le test au farinographe des farines de blé dur donne généralement des valeurs d'absorption d'eau plus élevées que celles du blé tendre (TORBICA *et al.*, 2011) en raison du taux élevé d'amidon endommagé pendant la mouture, mais il montre un temps de développement de la pâte court et une tolérance au pétrissage élevée (BAKHSHI et BAINS 1987, BOYACIOGLU et D'APPOLONIA 1994a).

Le blé dur a été donc classé comme ayant une mauvaise qualité boulangère sur la base des tests au farinographe et au mixographe (BOYACIOGLU et D'APPOLONIA 1994a). Aussi, les farines de blé dur ont montré des propriétés rhéologiques inférieures par rapport aux farines de blé tendre lorsqu'elles sont évaluées par l'alvéographe et l'extensigraphe (MATSUO et IRVINE, 1970, BAKHSHI et BAINS 1987, BOYACIOGLU et D'APPOLONIA 1994a).

Toutes ces caractéristiques rhéologiques indiquent que le gluten de blé dur est, en général très tenace et moins élastique comparé à celui du blé tendre (DICK, 1981; FEILLET, 1988 ; BOYACIOGLU et D'APPOLONIA 1994a).

Généralement, l'extensibilité de la pâte de blé dur n'est pas appropriée pour la panification. En dépit de cela, CIAFFI *et al.* (1995) ont pu obtenir de bons pains à partir des lignées de blé dur contenant l'allèle *Glu-A1* provenant du (*Triticum diccoides*) et l'allèle LMW-2 au niveau du locus *Glu-B3* provenant du blé dur parental.

IV.6 Sélection et amélioration du blé dur

L'utilisation de blé dur pour la production de pain ne cesse d'augmenter dans de nombreuses régions méditerranéennes. Plusieurs types de pain, dont les caractéristiques varient selon les

habitudes locales, se sont répandus en raison de leurs qualités et le développement de la cuisine méditerranéenne.

Depuis 1984, l'Institut expérimental de recherche sur les céréales de la région de Catane a évalué la qualité boulangère des cultivars de blé dur italiens (BOGGINI et *al.*, 1988, 1994). Ces études ont montré que la plupart des cultivars de blé, sélectionnés pour la pastification, présente généralement un gluten très fort et peu extensible. Ces caractéristiques sont inaptées à la panification. Pour cette raison, un programme de croisement fut entamé pour améliorer la qualité boulangère du blé dur. En effet, pour avoir des volumes de pain de blé dur semblables à ceux du blé tendre, RAO et *al.* (2010) combinent entre la force et l'extensibilité du gluten en faisant des croisements entre le blé dur et le *Triticum turgidum* (97 Emmer19).

Les recherches de BOGGINI et *al.* (1995a,b,1998) montrent que la relation exacte entre la ténacité et l'élasticité du gluten dépend principalement des sous-unités HPM Glu-A1 qui ont montré une meilleure panification mais n'améliorent pas les performances à la cuisson.

Sur la base de ces résultats, PALUMBO et *al.* (2000) ont examiné la qualité boulangère des génotypes de blé dur dérivés d'hybridation interspécifique avec le blé tendre (*Triticum aestivum*) pour transférer les SG-HPM codées par le chromosome 1A (Glu-A1), généralement absent dans la plupart des cultivars de blé dur. Les meilleurs résultats qualitatifs furent trouvés dans les lignées caractérisées par les sous-unités gluténines HPM Glu-A1 Nulle et Glu-B1 (7+8).

Afin d'améliorer la qualité de cuisson des pâtes de blé dur, une plus grande extensibilité de la pâte et une meilleure force sont nécessaires. La solution la plus prometteuse pourrait être l'incorporation des protéines de gluten codées par le génome D (AMMAR et *al.*, 2000).

Génétiquement, les blés dur sont tétraploïdes (AABB) et n'ont pas le génome D présent dans les blés tendres hexaploïdes (AABBDD). L'absence du génome D, en particulier le chromosome D1 est considérée comme plus ou moins responsable de la faible qualité boulangère du blé dur (KEBER et TIPPLES, 1969 ; GAZZA et *al.*, 2011). Les travaux de REDAELLI et *al.* (1997) sur le blé tendre démontrent que le chromosome D1 est responsable de l'élasticité et l'extensibilité de la pâte. C'est dans cette optique que plusieurs travaux ont été menés dans le but d'améliorer la qualité boulangère du blé dur ;

L'incorporation des protéines codées par le génome D améliore la qualité boulangère du blé dur par le transfert du segment du chromosome D1 à partir d'un blé hexaploïde vers le blé dur (CEOLONI *et al.*, 1996; LAFIANDRA *et al.*, 2000; POGNA *et al.*, 1996).

CEOLONI *et al.* (1996) et POGNA *et al.* (1996) ont signalé un effet positif sur la qualité du pain, lorsque les SG-FPM codées par le locus Glu-D3 sont transférées dans les génotypes de blé dur.

GAZZA *et al.* (2011) ont montré que les lignées de blé dur issues d'un croisement avec le blé soft réduisent la dureté du grain et diminuent l'absorption de l'eau au farinographe, la ténacité (P) et par conséquent, le rapport P/L, mais augmente la stabilité (farinographe), la tolérance au pétrissage et l'extensibilité de la pâte. Selon ces mêmes auteurs, ce type de blé dur peut avoir d'importantes implications pratiques et utiles pour la sélection variétale et la qualité technologique du blé dur.

V. LES PROTEINES DU BLE

Second constituant pondéral après l'amidon, les protéines forment 8 à 18 % de la matière sèche du blé : elles sont inégalement réparties entre les différentes couches histologiques du grain.. Cette teneur en protéines dépend des conditions agroclimatiques de développement de la plante, notamment l'alimentation en eau (sécheresse, irrigation) et la fertilisation azotée et des variétés cultivées (FEILLET, 2000).

V.1 Classification et propriété

V.1.1 Solubilité et classification

Le système de classification des protéines des céréales a longtemps été basé sur le travail d'Osborne (1907) qui utilise les différences de solubilité dans différents solvants, chez le blé, quatre fractions sont séparées (tableau 7) :

- **Les albumines**, solubles dans l'eau ;
- **Les globulines**, solubles dans les solutions salines diluées ;
- **Les gliadines**, solubles dans les alcools dilués ;

- **Les gluténines**, protéines résiduelles insolubles dans les solvants précédents, partiellement solubles dans les solutions acides diluées et dans l'urée et solubilisées en présence de détergents (SDS) et de réducteurs (mercapto-2-éthanol, dithiothréitol).

V.1.2 Les protéines non gluten (solubles)

Les albumines et les globulines sont des protéines cytoplasmiques ou métaboliques. Elles représentent 15 à 20 % des protéines totales. Ce sont des protéines globulaires pauvres en acide glutamique et proline, mais riches en acides aminés basiques.

- Les albumines : leur poids moléculaire va de 12000 à 60000, elles constituent 9 % des protéines totales, et contiennent des glycoprotéines.

La teneur en acides aminés des albumines est légèrement inférieure à celle des globulines. Elles renferment des teneurs élevées en acide glutamique et en tyrosine (DACOSTA, 1986).

- Les globulines : représentent 6 à 12 % des protéines totales. Solubles dans les solutions salines, de poids moléculaire compris entre 20 000 et 210 000. Les globulines sont pauvres en tryptophane et en azote amidé, mais très riches en arginine. Elles peuvent exister sous forme de complexes lipoprotéines remarquablement riche en phosphore (FEILLET, 2000).

Elles sont constituées de protéines se différenciant par leurs propriétés physico-chimiques (PM, acides aminés) et fonctionnelles (activités enzymatiques: α - et β -amylase, protéases, oxydo-réductases ; inhibiteurs d'enzymes, pouvoirs émulsifiant et moussant...).

Les gliadines et les gluténines sont des protéines de réserve, elles sont les principaux constituants du gluten.

Tableau 7: Composition en protéines du grain de blé.

| Solvant | Groupe protéique | % Protéines totales | Poids moléculaire |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| Eau | Albumines | 15 | 5000-30000 |
| NaCl 0,5N | Globulines | 5 | 20 000-90 000 |
| Ethanol 70% | Gliadines | 30-40 | 25 000-75 000 |
| Acide acétique 0,01 N | Gluténines solubles | 15-20 | 100 000 et plus |
| Résidu insoluble | Gluténines insolubles | 25-35 | 1 000 000 et plus |

(FEILLET, 2000)

L'évolution des techniques de fractionnement et d'analyse a permis une classification plus fine des protéines, basées sur leurs caractéristiques structurales et génétiques (SHEWRY *et al.*, 1986). Les gliadines et les gluténines sont regroupées au sein de la famille des prolamines, elle-même subdivisée en trois groupes en fonction de leur composition en acides aminés sulfurés et de leur degré de polymérisation (Figure 6).

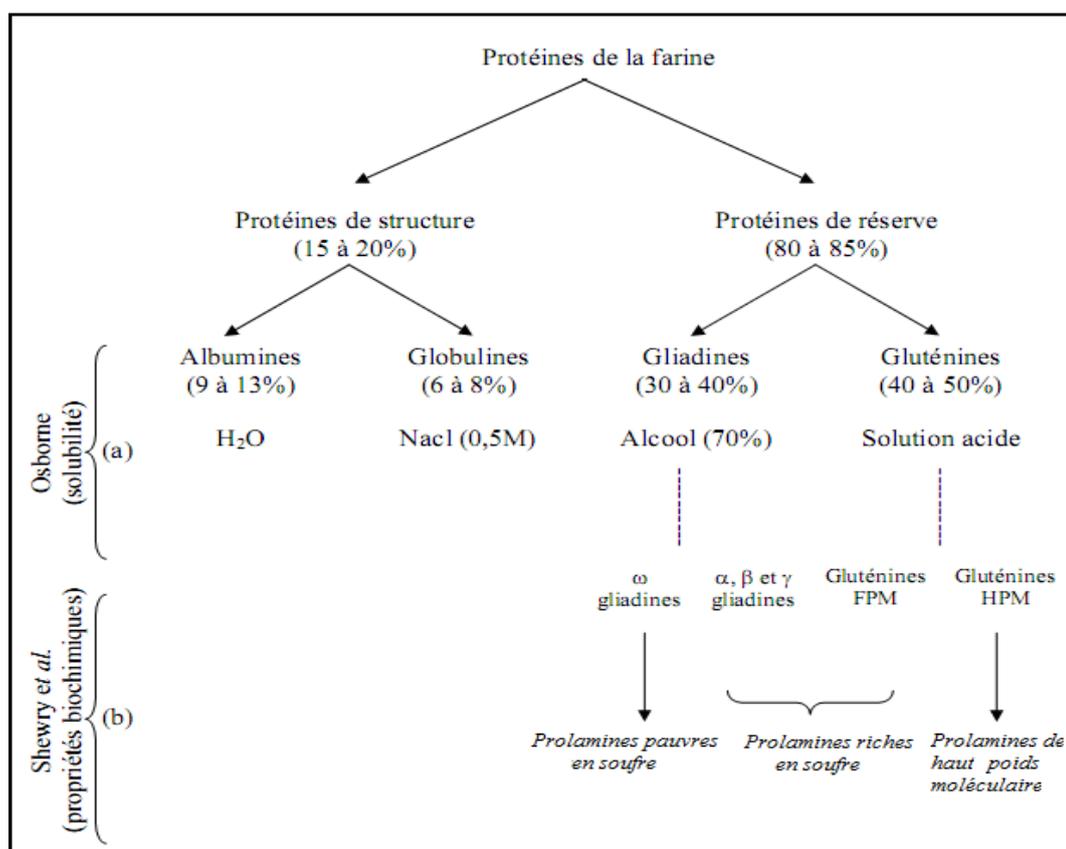


Figure 6 : Classifications des protéines de la farine proposées par (a) OSBORNE (1907) et (b) SHEWRY *et al.* (1986).

V.1.3 Protéines du gluten : gliadines et gluténines

Le gluten est un complexe protéique viscoélastique obtenu par lixiviation d'une pâte de farine de blé tendre ou de semoule de blé dur. Constitué principalement de protéines (75 à 85% M.S. selon les conditions de fabrication), il contient aussi de l'amidon (8 à 10% M.S.), des sucres réducteurs (1 à 2% M.S.), des lipides (5 à 10% M.S.), des pentosanes (2% M.S.) et des matières minérales (1% M.S.). La fraction protéique du gluten est constituée des gliadines, qui lui confèrent ses propriétés d'extensibilité, et des gluténines, qui contribuent à sa ténacité et à son élasticité (SCHOFIELD et BOOTH, 1983).

La principale différence entre les gliadines et les gluténines repose sur le fait que les gliadines sont des chaînes de polypeptides monomériques associées par des ponts hydrogène et hydrophobe alors que les gluténines sont constituées de multiples chaînes liées entre elles par des ponts disulfures (MAC RITCHIE, 1992).

V.1.3.1 Les gliadines

Représentent 40 à 45% des protéines totales, de poids moléculaires compris entre 25.000 et 70.000. Elles présentent un grand polymorphisme d'origine génétique. On distingue 3 types de gliadines : les α/β , les γ et les ω gliadines qui représentent respectivement 44-60%, 30-46% et 6-20% des gliadines totales (WIESER et *al.*, 1994). Leur masse moléculaire estimée par électrophorèse en présence de SDS est comprise entre 30.000 et 40.000 pour les α/β , et γ gliadines et entre 60.000 et 80.000 pour les ω gliadines. Les gliadines se caractérisent généralement par une très grande richesse en glutamine et en proline et une très faible teneur en acides aminés basiques.

Elles adoptent une structure globulaire, riche en hélice α et / ou en coudes β , exceptée pour les ω -gliadines, la chaîne polypeptidique unique est repliée sur elle-même et maintenue par des ponts disulfures intramoléculaires (SHEWRY et TATHAM, 1990).

Il est généralement admis que les gliadines contrôlent les qualités viscoélastiques des pâtes, notamment l'extensibilité et le volume du pain (DUBOIS, 1996).

V.1.3.2 Les gluténines

Représentent 25 à 40% des protéines totales, résidu insoluble après extraction des autres types protéiques, elles ont un poids moléculaire dépassant les 100 millions (SHEWRY et *al.*, 2002). Moins riches en acide glutamique et en proline que les gliadines, elles le sont davantage en arginine, lysine et tryptophane. Ce sont des gros polymères, qui seraient liés entre eux par deux ponts disulfures intercaténaux et deux ou trois ponts intracaténaux (SHEWRY et *al.*, 1995). Leur structure secondaire admet de nombreux coudes β . Les ponts disulfures intra et intermoléculaires jouent un rôle majeur dans l'établissement de la structure tridimensionnelle des sous unités de gluténines et de leur degré de polymérisation (SHEWRY et *al.*, 1995).

Les gluténines présentent un polymorphisme aussi important en raison de leur tendance à s'associer par l'intermédiaire d'interactions hydrophobes, de liaison hydrogènes et de ponts disulfures intermoléculaires (SHEWRY *et al.*, 1995). Après rupture des liaisons disulfures à l'aide d'un agent réducteur, l'électrophorèse en gel de polyacrylamide en milieu dénaturant montre que la fraction gluténine est constituée de 2 types de sous-unités:

- Les sous unités gluténines à faible poids moléculaires SG-FPM 30.000-50.000 ;
- Les sous unités gluténines à haut poids moléculaires SG-HPM 80.000-120.000.

(OAK et DEXTER., 2006).

Chaque génotype de blé dur contient 1 à 3 SG-HPM (BRANLARD et LEBLANC, 1985) alors qu'il renferme au moins 7 SG-FPM dans le blé tendre (GUPTA et SHEPHERD, 1988).

Dans les années 80, les travaux de Payne et ses collaborateurs ont largement contribué à la connaissance biochimique et génétique des SG-HPM.

➤ Les **SG-FPM** représentent environ 60-80% de l'ensemble des gluténines, le 1/3 est constitué par les SG-HPM (WIESER *et al.*, 1994). Elles représentent 20 à 30% des protéines totales (GUPTA *et al.*, 1992), et 40% des protéines du gluten (JIANG *et al.*, 2008).

Ces protéines ont été longtemps confondues avec les α , β et γ gliadines dont elles se rapprochent par leur composition (richesse en S), leur structure secondaire et leur propriétés physico-chimiques (TATHAM *et al.*, 1987).

Elles sont en particulier plus hydrophobes que les SG-HPM (BURNOUF et BIETZ, 1984). Les SG-FPM sont codées par les gènes situés sur les loci Glu-A3, Glu B-3 et Glu-B2 sur le chromosome 1 (OAK et DEXTER, 2006 ; SISSONS, 2008).

➤ Les **SG-HPM** : comme ces gènes sont silencieux, la plupart des génotypes possèdent seulement un à trois sous-unités (OAK et DEXTER, 2006 ; SISSONS, 2008)

Ce sont des polypeptides pauvres en S, présentent un fort pouvoir agrégatif lié à leur haut poids moléculaire et à la présence de résidus cystéines localisés à chaque extrémité des polypeptides (FEILLET, 2000). Les HMWG sont codées par 2 groupes de gènes constituant les

loci Glu-A1 et Glu-B1 et localisés respectivement sur les bras longs des chromosomes 1A et 1B (PAYNE *et al.*, 1984).

V.2 Contribution des protéines de réserve à la qualité boulangère

La complexité de la relation entre la composition protéique et la qualité exige une connaissance à différents niveaux : la teneur en protéines, la composition, ratio de gluténine/gliadine, et le ratio de SG-HPM/SG-FPM (SISSONS, 2008). La protéine polymérique (gluténine) est principalement responsable de l'élasticité de la pâte, tandis que les monomères de gliadines sont liés au caractère d'extensibilité de la pâte. Donc le rapport entre les gluténines et les gliadines peut être directement lié à l'équilibre entre la force de la pâte et l'extensibilité (WRIGLEY *et al.*, 2006), tandis que l'effet de la variation du ratio de SG-HMW à SG-FPM est moins claire selon SISSONS (2008).

L'impact de ces sous-unités protéiques sur les propriétés et la qualité de la pâte a été étudié pendant de nombreuses années. Certains travaux ont rapporté une association entre la composition allélique des gènes codant les gluténines et la force du gluten du blé dur (DU CROS, 1987; POGNA *et al.* 1990; AMMAR *et al.* 2000; BRITES et CARRILLO 2001; SISSONS *et al.* 2005b).

CARRILLO *et al.* (1990,2000) expliquent que dans le blé dur, la différence de qualité entre les variétés dépend fortement de leur composition allélique codant les protéines de réserve de l'endosperme. L'une des plus importantes catégories de ces protéines représente les (SG-FPM), codées par le locus *Glu-3* (LERNER *et al.*, 2004). Les SG-FPM permettent de mieux expliquer les différences qualitatives entre les cultivars que les SG-HPM codées par le *GLU-1* (CARRILLO *et al.*, 1990 ; RUIZ et CARRILLO, 1995), ce qui n'est pas le cas dans le blé tendre (PAYNE *et al.*, 1984).

Parmi les quatre groupes protéiques définis précédemment, les gluténines sont reconnues comme jouant un rôle clé dans les propriétés rhéologiques de la semoule (FEILLET, 2000).

V.2.1 Gliadines, gluténines

Comparée à la farine de blé tendre, la farine de blé dur présente une teneur plus élevée en gluten mais de caractéristiques rhéologiques inférieures (LIU et *al.*, 1996). Cela est dû à la différence de distribution des fractions de gluten (PERSSINI et *al.*, 1999).

Le gluten de blé dur contient des teneurs élevées en gliadines et des teneurs faibles en gluténines, ce qui explique sa faible élasticité (QUAGLIA, 1988 ; BOYACIOGLU et DAPPOLONIA, 1994a).

D'autres travaux (POGNA et *al.*, 1990; ABECASSIS, 1990) ont montré une liaison génétique étroite entre la γ -gliadine 42 et un quadruplet des sous unités gluténines de faibles poids moléculaires (LMW-1) et d'autre part entre la γ -gliadine 45 et un triplet des sous unités gluténines de faibles poids moléculaires (LMW-2). Ces LMWG possèdent un fort pouvoir agrégatif qui se manifeste au cours de la transformation de la semoule en pâte. Ces propriétés agrégatives contribuent à la formation du réseau protéique qui confère à la pâte ses propriétés viscoélastiques. EDWARDS et *al.* (2003), dans des essais de reconstitution, ont montré que les LMW-2 renforcent la pâte plus que les LMW-1. Cependant, aussi bien en raison de leur importance quantitative que sans doute également de leurs propriétés spécifiques, ces protéines peuvent contribuer de manière significative à ce qu'il est convenu d'appeler, dans une acception très large, la qualité technologique des blés et des farines (MELAS et *al.*, 1994).

Des travaux sur les gluténines ont montré que les blés durs ayant une bonne qualité boulangère possèdent des sous-unités gluténines à faible poids moléculaire désignées comme (LMW-2) accompagnées des sous-unités de gluténines à haut poids moléculaire (SG-HPM) 7+8 ou 6+8 (BOGGINI et POGNA, 1989 ; PENA et *al.*, 1994 ; SISSONS et *al.*, 2005b ; EDWARDS et *al.*, 2007 ; SAPIRSTEIN et *al.*, 2007)

L'effet de la composition protéique sur la qualité du blé dur a été mis en évidence à travers les corrélations existantes entre les gliadines et gluténines et les différents tests d'évaluation de la force du gluten. DAMIDAUX et *al.* (1980) ont noté une relation entre la composition électrophorétique des gliadines et la recouvrance élastique du gluten. Ainsi, la présence de la γ -gliadine 45 est associée à une bonne viscoélasticité du gluten et la γ -gliadine 42 a un gluten de faible viscoélasticité. Des travaux ultérieurs ont confirmé cette

correspondance sur un très grand nombre de cultivars (DU CROS et *al.*, 1982 ; PAYNE et *al.*, 1984 ; HAILU et *al.*, 2006 ; FERRANTE et *al.*, 2006).

Des travaux sur des variétés italiennes et espagnoles ont mis en évidence la liaison entre la qualité boulangère des blés durs et la présence des sous unités gluténines HPM (1B) (7+8) par opposition aux sous unités gluténines HPM (20) et (6+8). La présence des sous unités (7+8) s'accompagne d'un volume de sédimentation SDS plus élevé (BOGGINI et *al.*, 1988 ; BOGGINI et POGNA 1989). Mais d'autres résultats (BRITES et *al.*, 1997 ; IMPIGLIA et *al.*, 1997 ; MORAGUES, 2006) indiquent que les sous unités (6+8) influeraient de manière équivalente sur la ténacité du gluten déterminée par le volume de sédimentation SDS.

Les variations quantitatives des sous unités des gluténines liées au polymorphisme des SG-HPM peuvent modifier profondément les propriétés rhéologiques des glutens (SINGH et *al.*, 1990 ; HAILU et *al.*, 2006; SAPIRSTEIN et *al.*, 2007).

Les relations établies entre la composition protéique et la qualité boulangère ont montré que les gluténines insolubles dans le propanol et solubles dans le propanol-dithiothreitol sont reliées à la force du gluten (SAPIRSTEIN et FU, 1998 ; SAPIRSTEIN et *al.* 2007).

AMMAR et *al.* (2000) ont constaté que le volume du pain est corrélé positivement aux protéines totales, au pourcentage de polymères dans la farine et aux pourcentages de polymères inextractibles par le SDS (% UPP) dans la farine et dans les protéines polymériques totales.

Les gluténines insolubles contribuent largement à la détermination de la force du gluten et les paramètres de force de la pâte (temps de pétrissage, gluten index, la force de la pâte W et la résistance maximale) (WANG et KOVACS, 2002a ; 2002c). Ces auteurs ont trouvé que les gluténines insolubles ainsi que le SIG (swelling index of glutenin) sont de bons indicateurs de la qualité du gluten du blé dur et tendre.

Les teneurs en protéines totales, albumines+globulines, et sous unités gluténines HPM et FPM dans la farine sont significativement et positivement corrélées au volume du pain (WANG et *al.*, 2007). Ils ont montré aussi que le ratio protéines polymériques/ protéines monomériques était hautement corrélé au volume du pain de blé tendre. Ce rapport peut être utilisé comme outil dans la prédiction de la qualité d'un blé.

V.2.2 SG-HPM

PAYNE *et al.* (1987) ont montré une association entre les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM) et la qualité des farines de blés tendres.

Une relation similaire a été démontrée pour les farines de blé dur (BOGGINI et POGNA, 1989 ; LIU et RATHAJEN, 1996).

L'influence des SG-HPM 1 sur les propriétés de la pâte a montré un effet positif sur la qualité du gluten (BRITES et CARRILLO 2001 ; MARTINEZ *et al.*, 2005).

La force du gluten de blé dur est fortement liée à la proportion de gluténines insolubles à haut poids moléculaire (HPM) (DEXTER et MATUSO, 1980a ; EDWARDS *et al.*, 2001).

Les SG-HPM semblent avoir un effet moins significatif sur la force du gluten de blé dur (DU CROS, 1987; PORCEDDU *et al.*, 1998) mais cela n'a pas été clairement établi en raison de la limitation de la variabilité génétique aux loci Glu-1 présents dans les cultivars de blé dur utilisés dans les études publiées. Certains auteurs ont montré que les blés durs avec les SG-HPM (6+8) et (7+8) améliorent la force du gluten contrairement à la HMW-GS (20) qui a tendance à le rendre faible (AMMAR *et al.*, 2000; BRITES et CARRILLO 2001; OAK *et al.*, 2004; SISSONS *et al.*, 2005b)

Cette faible force est probablement due à un nombre réduit de liaisons disulfures intermoléculaires (moins de résidus cystéine à l'extrémité N-terminale), traduisant une faible teneur en protéines polymériques. L'association d'autres SG-HPM chez le blé dur à la force du gluten est moins claire avec des résultats contradictoires (DU CROS, 1987; POGNA *et al.*, 1990 ; AMMAR *et al.*, 2000; BRITES et CARRILLO, 2001; SISSONS *et al.*, 2005b) ce qui suggère que les différences qualitatives dans les sous-unités de gluténines HPM ne sont pas des facteurs déterminants primordiaux sur la force du gluten du blé (DUCROS, 1987 ; RUIZ *et al.*, 1995).

V.2.3 SG-FPM

La formation d'un réseau bien développé dans le cas du blé dur serait préférentiellement due à l'implication des SG-FPM plutôt que les SG-HPM (SISSONS, 2008).

La ténacité élevée du gluten de blé dur peut être plus ou moins associée à la proportion élevée en sous-unités de gluténines FPM dans le blé dur par rapport au blé tendre (DEXTER, 2003) résultant d'une plus grande densité de liaisons ramifiées (RAO *et al.*, 2001).

Les données d'EDWARDS *et al.* (2003) ont montré que le gluten de blé dur ne forme pas de réseau impliquant les SG-HPM contribuant à la force du gluten, cette dernière est basée sur un type de polymère associatif de structure impliquant les SG-FPM, où des longueurs de chaînes plus courtes entraînent une plus grande densité de liaisons réticulées pour un volume donné et donc une plus grande force.

CIAFFI *et al.* (1995) constatent que les SG-FPM de type 2 augmentent le volume du pain.

V.2.4 Ratio gluténine/gliadine

La qualité boulangère d'une farine dépend d'un équilibre entre la fraction gluténine responsable de l'élasticité de la pâte et de la fraction gliadine responsable de l'extensibilité de la pâte et du volume du pain (DACOSTA, 1986).

Les travaux de WASIK et BUSHUK, (1975) ; DEXTER et MATUSO, (1978) rapportent des corrélations élevées entre le rapport gluténine/gliadine et la force de la pâte. L'introduction du génome D (SG-HPM 5+10) dans le blé dur augmente la force de la pâte et le ratio gluténine/gliadine (LIU *et al.*, 1994 ; LAFIANDRA *et al.* 2000).

Selon FEILLET (2000), l'importance relative de certaines protéines du gluten (gliadines, gluténines, SG-HPM, SG-FPM) est en relation avec le comportement des farines en panification. Ainsi, les farines sont d'autant plus fortes que le rapport gluténines/gliadines ou son équivalent protéine polymériques/protéines monomériques est élevée.

SISSONS *et al.* (2005b) trouvent que l'augmentation de la teneur en gluténine améliore la force de la pâte tandis que l'incorporation des gliadines et les SG-FPM la diminuent. Cette teneur élevée en gluténines provoque un déplacement du poids moléculaire (une augmentation des protéines polymériques inextractibles). Cependant la distribution de la taille moléculaire influence les propriétés de la pâte (SOUTHAN et MACRITCHIE, 1999).

L'augmentation du rapport gluténines/gliadines (polymères/monomères) par addition de fractions enrichies en gluténine à une farine basse améliore la force la pâte

(UTHAYAKUMARAN *et al.* 1999 ; EDWARDS *et al.*, 2003 ; GRABBERGER *et al.*, 2003 ; SISSONS *et al.*, 2005a).

Toutefois, EDWARDS *et al.* (2007) ont trouvé sur des génotypes possédant différentes forces, une faible corrélation entre le rapport gluténines/gliadines et la résistance de la pâte. Ils expliquent cette relation par la variation des SG-FPM contenues dans les gluténines des blés durs étudiés.

V.2.5 SG-HPM / SG-FPM

EDWARDS *et al.* (2007) ont trouvé des corrélations négatives entre le ratio SG-HPM/SG-FPM et la ténacité P, l'extensibilité L, W alvéographiques, ainsi que le temps de développement et la hauteur de développement au mixographe,. Autrement dit, lorsque la proportion des SG-HPM augmente, la force diminue, à l'inverse des résultats trouvés par (SISSONS *et al.* 2007).

V.3 FRACTIONNEMENT DES PROTEINES DU BLE

Le fractionnement et la caractérisation des protéines du blé ont permis d'identifier les constituants protéiques associés avec la qualité boulangère.

Un nombre important de méthodes de fractionnement des protéines du blé a été développé, dont la plus ancienne est la méthode d'OSBORNE (1907). Ces méthodes sont basées sur la différence de solubilité des protéines de farine de blé dans un certain nombre de solvants et selon des séquences déterminées.

Pour les albumines et les globulines ou protéines salino-solubles, leur extraction se fait généralement par des solutions de NaCl tamponnées ou non (OSBORNE, 1907 ; FU et SAPIRSTEIN, 1996).

SAPIRSTEIN et FU (1998) ont extrait les gluténines insolubles en utilisant du propanol-1 à 50% contenant 1% du DTT.

Afin d'éviter la contamination des gluténines par les ω -gliadines, FU et KOVACS (1999) ont développé un procédé d'extraction simple et rapide qui consiste à extraire les protéines monomériques par une solution contenant 0,3 M NaI-7,5% propanol 1.

MELAS *et al.* (1994), ont utilisé le propanol-2 à 50% pour extraire les gliadines ensuite les sous unités de gluténines sont solubilisées à l'aide du propanol-2 à 50%+ 0,08 M Tris-HCl (pH=8) + 1% de dithiothreitol (DTT) à 60°C.

Les sous-unités de gluténines HPM sont précipités par l'acétone à 40% ; la concentration en acétone dans le surnageant est augmentée à 80% pour précipiter les sous-unités de gluténines FPM.

Plus tard, WANG et KOVACS (2002 c) ont utilisé la méthode de FU et KOVACS (1999) pour extraire les protéines monomériques du blé dur, ils ont ensuite extrait les gluténines solubles avec le propanol-1 à 40% ; et enfin les gluténines insolubles avec le propanol-1 à 40% à 60°C contenant 0.2% de DTT. SAPIRSTEIN *et al.* (2007) ont utilisé une solution de propanol-1 à 50% puis une solution de propanol-1 à 50% contenant 0,1% de DTT dans le cas du blé dur.

CAPOCCHI *et al.* (2000) ont utilisé la méthode de VERBRUGGEN *et al.* (1998) sur le blé dur pour l'obtention des sous unités gluténines d'une grande pureté. D'abord les gliadines ont été extraites à température ambiante avec le propanol-1 à 50 % ; puis les gluténines ont été solubilisées à 60°C avec du propanol-1 à 50 % contenant 1 % de Dithiothreitol (DTT). A partir des extraits de gluténines ainsi obtenus, les sous unités de gluténines HPM ont été sélectivement précipitées par l'augmentation de la concentration du propanol-1 jusqu'à 60 %. Après centrifugation la concentration du Propanol-1 du surnageant obtenu est augmentée à 85% pour précipiter les sous unités de gluténines FPM.

I. MATERIEL VEGETAL

L'étude a été réalisée sur 14 fractions de mouture de blé dur commercial issu de la campagne 2010-2011 provenant de trois moulins différents :

- Les Moulins Industriels de Sebaou « SARL MIS » situés dans la zone industrielle de Draa Ben Khadda (Tizi-Ouzou) ;
- « ERIAD » Baghlia (Boumerdes) ;
- Complexe pâtes « LABELLE » sis dans la commune de Ouled Moussa (Boumerdes).

Après nettoyage, les grains sont conditionnés à 14% d'humidité pendant 24 heures puis à 17% d'humidité pendant 2 heures avant la mouture.

Le diagramme de mouture est donné en annexe 1.

Les échantillons de semoule et de farine ont été prélevés à partir de quatre lots de blés différents, ils se composent de deux parties : produits de passage et produits finis (tableau 8).

Tableau 8 : Liste des échantillons étudiés.

| Unités | Produits de passage | Produits finis |
|----------|-------------------------------|----------------|
| MIS 1* | FCG prélevée au niveau du DD1 | 3SF |
| | FPG prélevée au niveau du DD4 | 3SE |
| MIS 2* | FCG prélevée au niveau du DD1 | 3SF |
| | FPG prélevée au niveau du DD4 | 3SE |
| LA BELLE | / | 3SF |
| | / | 3SE |
| ERIAS | FCG prélevée au niveau du DD1 | 3SF |
| | FPG prélevée au niveau du DD3 | 3SE |

*Les échantillons de « MIS 1 » et « MIS 2 » sont prélevés à partir de deux blés différents au niveau de l'unité de « MIS ».

FCG : Farine du cœur du grain

DD1 : Désagrégateur de tête de mouture 1

DD4 : Désagrégateur de fin de mouture 4

3SF : Farine de blé dur entière

FPG : Farine de la périphérie du grain

DD3 : Désagrégateur de fin de mouture 3

3SE : Semoule fine entière

Après la mouture, les produits récupérés sont conservés à 4°C dans des bocaux en verre fermés hermétiquement pour limiter les modifications biochimiques et technologiques.

II. METHODES ANALYTIQUES

II.1 Analyses physico-chimiques

II.1.1 Teneur en eau (NA 1133-1990, ISO 712)

La teneur en eau représente la perte en masse exprimée en pourcentage, subie par le produit. Elle est déterminée sur 5g de produit, par séchage dans une étuve à 130°C pendant 2 heures pour la mouture entière et 1 h30 pour la farine/semoule.

II.1.2 Teneur en cendres ou matières minérales (NA. 733.1991, ISO 2171)

La teneur cendres des blés et produits de mouture est déterminée suivant les conditions décrites par la norme. 2 g de produit sont incinérés en présence d'éthanol à 95% à une température de 900°C +/- 25°C jusqu'à combustion complète de la matière organique. Le résidu obtenu est pesé, les résultats sont exprimés en pourcentage de matière sèche.

II.1.3 Analyse granulométrique ou taux d'affleurement (NF : 03-721 de juin 1994)

Elle est déterminée à l'aide d'un planschister de laboratoire BHULER, par tamisage d'un échantillon de 100 g de semoule ou de farine à travers une série de tamis avec une ouverture de mailles décroissantes, ensuite les refus de chaque tamis sont pesés.

Ouverture des mailles des tamis utilisés :

- Pour la semoule : 315 µm, 250 µm, 212 µm, 180 µm et 160 µm.
- Pour la farine : 212 µm, 180 µm, 160 µm, 140 µm et 125 µm.

Les refus obtenus sont pesés et les résultats sont exprimés en pourcentage.

$$TA(\%) = \frac{m_0}{m_1} \times 100$$

-
- m_0 : masse du refus (g) ;
- m_1 : masse de l'échantillon (g).

L'analyse granulométrique nous permet de déterminer le diamètre équivalent moyen (D50) et le paramètre de dispersion ou écart type géométrique ($Sg = D84/D50 = D50/D16$) représentatif de l'homogénéité des échantillons.

L'expression des résultats pour chaque tamis en pourcentage cumulé de la masse totale récupérée :

D50 : Diamètre équivalent moyen (μm) à 50% de probabilité.

Sg : Ecart type géométrique des particules à 50% de probabilité.

D84 : Diamètre des particules à 84% de probabilité.

D16 : Diamètre des particules à 16% de probabilité.

II.1.4 Indices de coloration

La couleur de la semoule et de la farine est déterminée à l'aide d'un colorimètre HUNTERLAB (géométrie 0/45, illuminant D65, angle d'observation 10°). Ces conditions sont celles retenues par la Commission Internationale de l'Eclairage. Les résultats sont exprimés en fonction du système d'unité de mesure CIE ($L^* a^* b^*$). L'échantillon est placé sous la source lumineuse, dix mesures successives sont effectuées en tournant l'échantillon d'un quart de tour avant chaque lecture de manière à limiter les effets dus à l'hétérogénéité de la réflexion sur une surface non homogène. L'indice b est d'autant plus élevé que la semoule est plus jaune, la valeur « $100-L$ » augmente avec le brunissement.

Par définition, la clarté ou luminance= L , indice de jaune (IJ)= b, indice de brun (IB)= $100-L$.

Les échelles de classement des échantillons selon HOULIAROPOULOS et *al.* (1981) sont données en (annexe 2/1).

II.1.5 Analyses physiques sur le grain

II.1.5.1 Taux de mitadinage (NA. 1183–1990)

Le taux de mitadinage représente le pourcentage de grains de blé dur non entièrement vitreux, ayant une apparence farineuse, en partie ou en totalité, ressemblant ainsi à un grain de blé tendre, ce qui déprécie le rendement en semoule.

Celui-ci a été réalisé à l'aide d'un coupe grains, le farinotome de « POHL » à raison de 6 coupes par échantillon. Le taux de mitadinage de l'échantillon examiné est donné par la formule suivante :

$$N = (n \times 100) / P$$

N : le pourcentage de grains mitadinés dans la fraction examinée ;

n : le nombre de grains mitadinés dans la fraction examinée ;

P : le nombre de grains examinés au farinotome (dans le cas de 6 coupes, P =300).

II.1.5.2 Poids de 1000 grains (PMG) (NA.730. 1991. ISO 520)

La mesure du poids de 1000 grains (g) peut fournir une évaluation du degré d'échaudage d'un blé. Elle est déterminée par comptage mécanique de 1000 grains entiers à l'aide de l'appareil auto-adapté « NUMIGRAL » puis pesés.

II.1.5.3 Moucheture

On détermine le poids de grains mouchetés dans 20 g de grains propres (l'appréciation de la moucheture est visuelle).

Seuls sont considérés comme mouchetés les grains qui présentent à d'autres endroits que sur le germe des colorations situées entre le brun et le noir brunâtre.

Les résultats sont exprimés en grammes de grains mouchetés pour 100 grammes d'échantillons.

II.2 Analyses biochimiques

II.2.1 Teneur en protéines totales (NA 1158-1990, ISO 1871)

L'analyse des protéines totales consiste à doser l'azote total selon la méthode de KJELDAHL dans les conditions décrites par la norme. La minéralisation est réalisée sur 1g de produit par l'acide sulfurique concentré en présence de catalyseur (Cu SO_4 et $\text{K}_2 \text{SO}_4$), l'ammoniac libéré est dosé par titrimétrie après addition de soude.

La teneur en protéines est calculée à partir de la teneur en azote protéique multipliée par le coefficient 5,7 et rapporté à la matière sèche. Les résultats sont exprimés en pourcentage de matière sèche.

II.2.2 Fractionnement par solubilité différentielle et dosage des fractions protéiques

Le fractionnement a été réalisé en deux étapes :

- La première consiste en l'extraction et le dosage des protéines monomériques (albumines, globulines, gliadines), par la méthode de FU et KOVACS (1999), les gluténines solubles et les gluténines insolubles suivant le protocole de WANG et KOVACS (2002c) dont les étapes sont semblables à celles données par les mêmes auteurs dans le cas du blé tendre (WANG et KOVACS 2002a) légèrement modifiées (dithiothreitol remplacé par le mercaptoéthanol) (figure 7).
- La deuxième étape consiste à séparer les SG-FPM et SG-HPM des gluténines insolubles par précipitation selon la méthode de MELAS et *al.* (1994) (figure 8).

Deux extractions sont faites à partir d' 1 g de farine/semoule en ajoutant 10 ml d'une solution de propanol-1 à 7,5 % + 0,3M NaI. Le mélange est agité au vortex durant 30 min puis centrifugé à 2200xG pendant 3 min. Deux surnageants S1 et S2 sont récupérés après chaque centrifugation. Le dernier culot résultant (C2) est remis en suspension à l'aide d'une baguette en verre dans 10 ml de la même solution puis agité au vortex pendant 1 min avant d'être centrifugé à 15000xG pendant 5 min.

Le surnageant S3 combiné aux surnageant S1 et S2 constituent les **protéines monomériques** et leur teneur en protéines est déterminée par la méthode de Kjeldhal.

Le culot C3 est remis en suspension à l'aide d'une baguette en verre puis extrait par 10 ml d'une solution de propanol-1 à 40% sous agitation au vortex pendant 30 min et centrifugé à

15000xG pendant 5 min à 4°C. L'opération est répétée trois fois, obtenant ainsi 3 surnageants (S4, S5, S6) qui sont dosés par la suite par la méthode Kjeldhal. Cette fraction constitue les **gluténines solubles**.

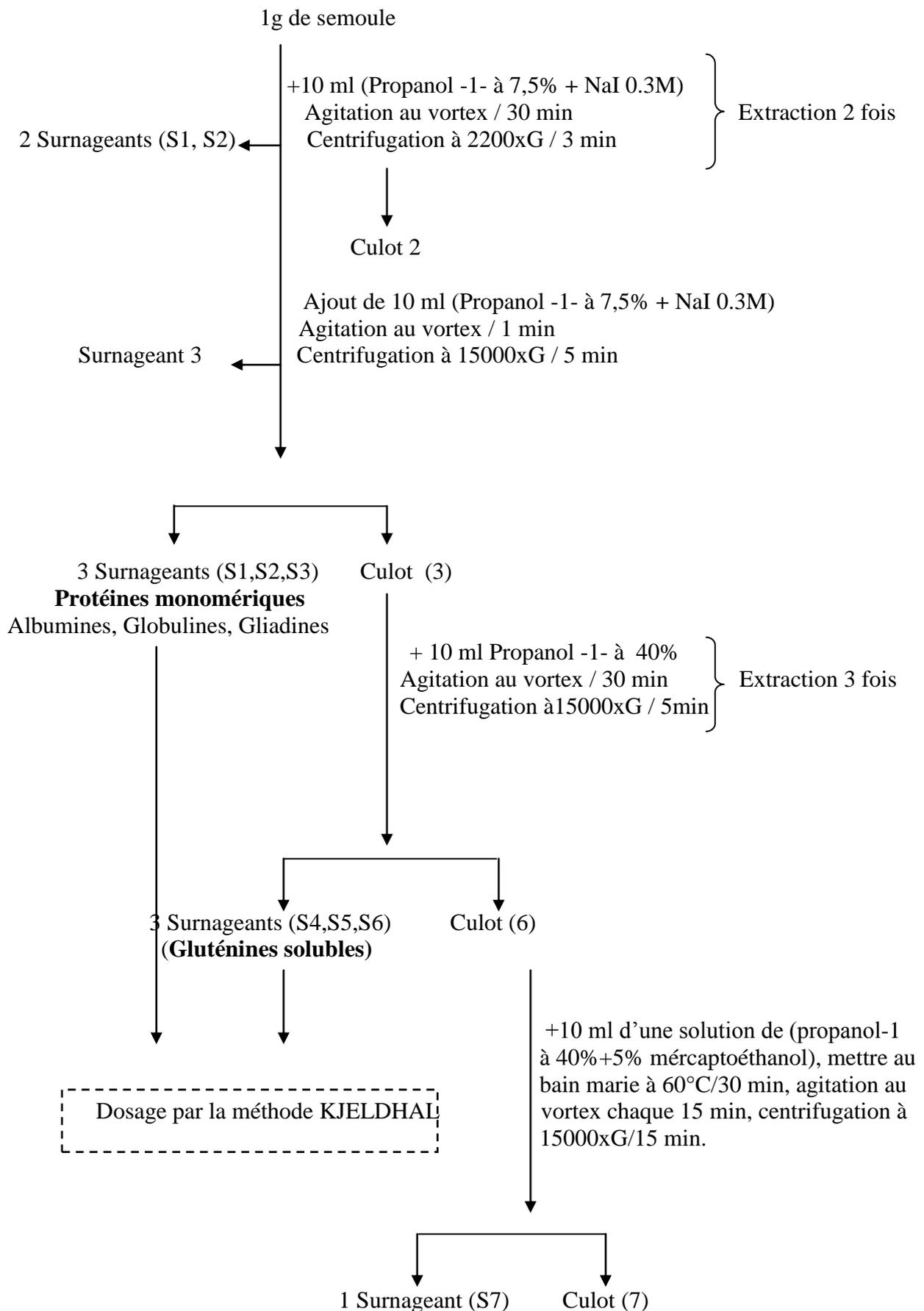
Par la suite, trois extractions successives sont effectuées à partir du culot C6 résultant avec 10ml, 5ml, puis 2,5 ml d'une solution de propanol-1 à 40% contenant 5% de mércaptoéthanol. Chaque extraction se fait au bain marie à 60°C pendant 30 min et en vortexant toutes les 15 min, elle est suivie d'une centrifugation à 40000xG pendant 5 min.

Les surnageants (S7, S8, S9) représentent la fraction des **gluténines insolubles**, ils seront séparés en SG-FPM et SG-HPM, et leur teneur en protéines dosée par la méthode de Kjeldhal.

Le culot C9 restant représente le résidu insoluble dans les solvants précédents, sa teneur en protéines sera dosée par la méthode de Kjeldhal.

Le fractionnement des gluténines insolubles en SG-FPM et SG-HPM est réalisé par précipitation suivant le protocole de MELAS *et al.* (1994) (figure 7).

Les surnageants S7, S8, S9 combinés sont précipités avec l'acétone à 40% (rapport 2ml de solvant pour 3ml de surnageant). Après homogénéisation des deux liquides, le mélange est laissé à température ambiante pendant 10 min puis centrifugé à 40000xG pendant 5 min. Le culot 10 obtenu représente les SG-HPM et le surnageant représente les SG-FPM. La teneur en protéines des deux sous-unités gluténines sont dosées par la méthode Kjeldhal.



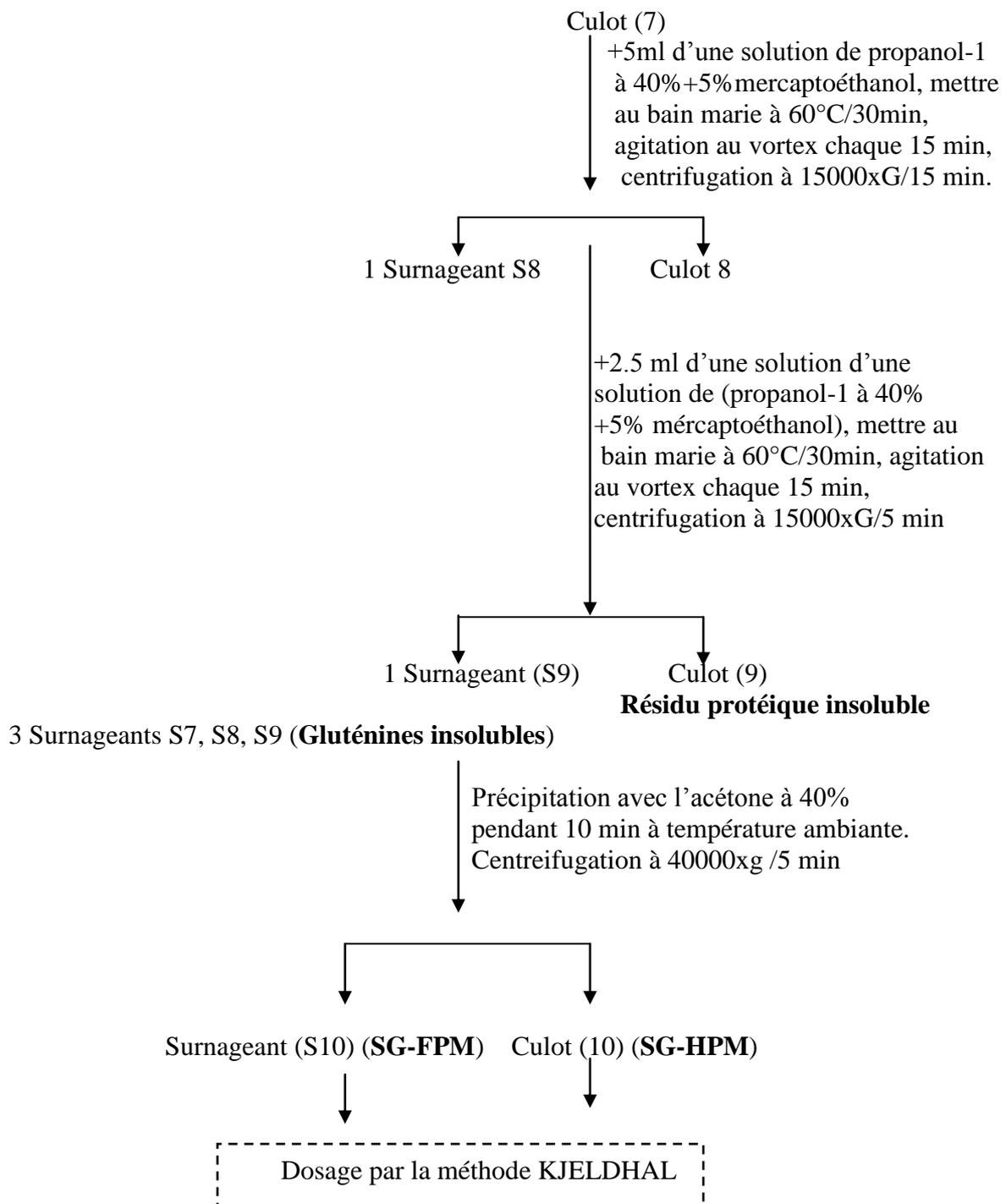


Figure 7 : Procédé de fractionnement séquentiel des protéines par combinaison des méthodes de FU et KOVACS (1999), WANG et KOVACS (2002c), MELAS et *al.* (1994) et inspiré des travaux de SADOUKI H.

II.3 Analyses technologiques

II.3.1 Dosage du gluten

Le gluten du blé, fraction insoluble des protéines dans une solution saline, est le responsable majeur de la qualité rhéologique des pâtes. Il est composé principalement de gliadines et de gluténines.

Le gluten est extrait par lixiviation et lavage d'un pâton issu de 10 grammes de farine avec une solution d'eau saline à 2 % de NaCl (MAUZE *et al.*, 1972).

Après lavage, la masse obtenue est essorée (gluten humide), pesée, puis séchée à l'étuve réglée à 130° C pendant 2 h et ensuite repesée (gluten sec). La teneur en gluten sec sera exprimée en pourcentage de la matière sèche.

$$GH(\%) = \frac{m_1}{10} \times 100$$

$$GSc(\%) = \frac{m_2}{10} \times 100$$

$$GSc(\%MS) = GS \times 100 / (100 - H)$$

m_1 : Masse en g du gluten humide (%MH).

m_2 : Masse en g du gluten sec (%MS).

H : pourcentage d'humidité.

II.3.1.1 Gluten index (CUBADDA et CARCEA, 1994)

Le gluten index permet d'évaluer les caractéristiques viscoélastiques du gluten par centrifugation du gluten humide à travers une grille perforée, afin de mesurer le pourcentage restant sur le tamis à la fin de l'opération.

La quantité du gluten qui reste sur le tamis est fonction des caractéristiques de ce dernier. Plus le gluten est tenace et élastique, plus la quantité passant au travers du tamis lors de la centrifugation est faible et plus le gluten index est élevé (ITCF, 1995).

Le calcul du gluten index (GIx) s'effectue selon la formule suivante :

$$\frac{(\text{Gluten restant sur le tamis(g)} \times 100)}{\text{Gluten total(g)}}$$

Le classement de la force du gluten en fonction du gluten index (GIx) selon CUBADDA et CARCEA (1994) est donné en (annexe 2/2).

II.3.2 Détermination de l'indice de chute Hagberg- Petren (NF. 03-703, ISO 3093 : 2004)

L'indice de chute est un des critères servant à sélectionner les lots de blé destinés à la panification.

Ce test permet de connaître l'activité diastasique qui intervient lors de la fermentation. Il permet également de voir s'il s'agit d'un blé germé et renseigne le meunier sur la correction qu'il devra faire sur la farine, en apportant du malt (apport de sucre) ou des amylases fongiques.

Le principe de cette mesure est basé sur la capacité de gélatinisation rapide d'une suspension aqueuse de farine/semoule contenue dans un tube dans un bain d'eau bouillante et sur la mesure de la liquéfaction de l'empois d'amidon par l'alpha-amylase présente dans l'échantillon.

Le résultat obtenu « temps de chute » exprimé en « secondes » représente le temps global s'écoulant entre le moment où le tube est placé dans le bain marie et le moment où l'agitateur est tombé d'une hauteur fixée à travers le gel d'amidon liquéfié.

La prise d'essai est fonction de l'humidité du produit à analyser, les valeurs sont données dans en annexe 3.

L'activité alpha-amylasique doit être optimum pour la panification, le classement donné par BARD (1997) est présenté en annexe (2/3).

II.3.3 Indice de sédimentation SDS (Sodium Dodecyl sulfate)

Ce test permet d'estimer la qualité des protéines d'un échantillon de semoule, par formation d'agrégats suite au gonflement des protéines en présence d'une solution à base d'acide lactique et de SDS (DICK et QUICK, 1983).

a- Mode opératoire

Le test de sédimentation dans le Sodium Dodecyl Sulfate (S.D.S) est réalisé selon la méthode proposée par AXFORD et *al.* (1979) dont le mode opératoire est schématisé dans la figure 8.

5g de semoule ou de farine sont mis en suspension avec 50 ml d'eau dans une éprouvette graduée de 100 ml. Une agitation manuelle brutale est effectuée pendant 15 secondes aux temps 0, 2, et 4 mn. Immédiatement après la dernière agitation, 50 ml d'une solution contenant 20 g/l de S.D.S et 20 ml/l d'acide lactique dilué au 1/8 sont ajoutés. Par la suite, 4 inversions lentes sont effectuées aux temps 0, 2, 4, et 6 mn. L'éprouvette est ensuite laissée au repos pendant 20 mn avant la lecture du volume de sédiment. Les résultats sont exprimés en ml.

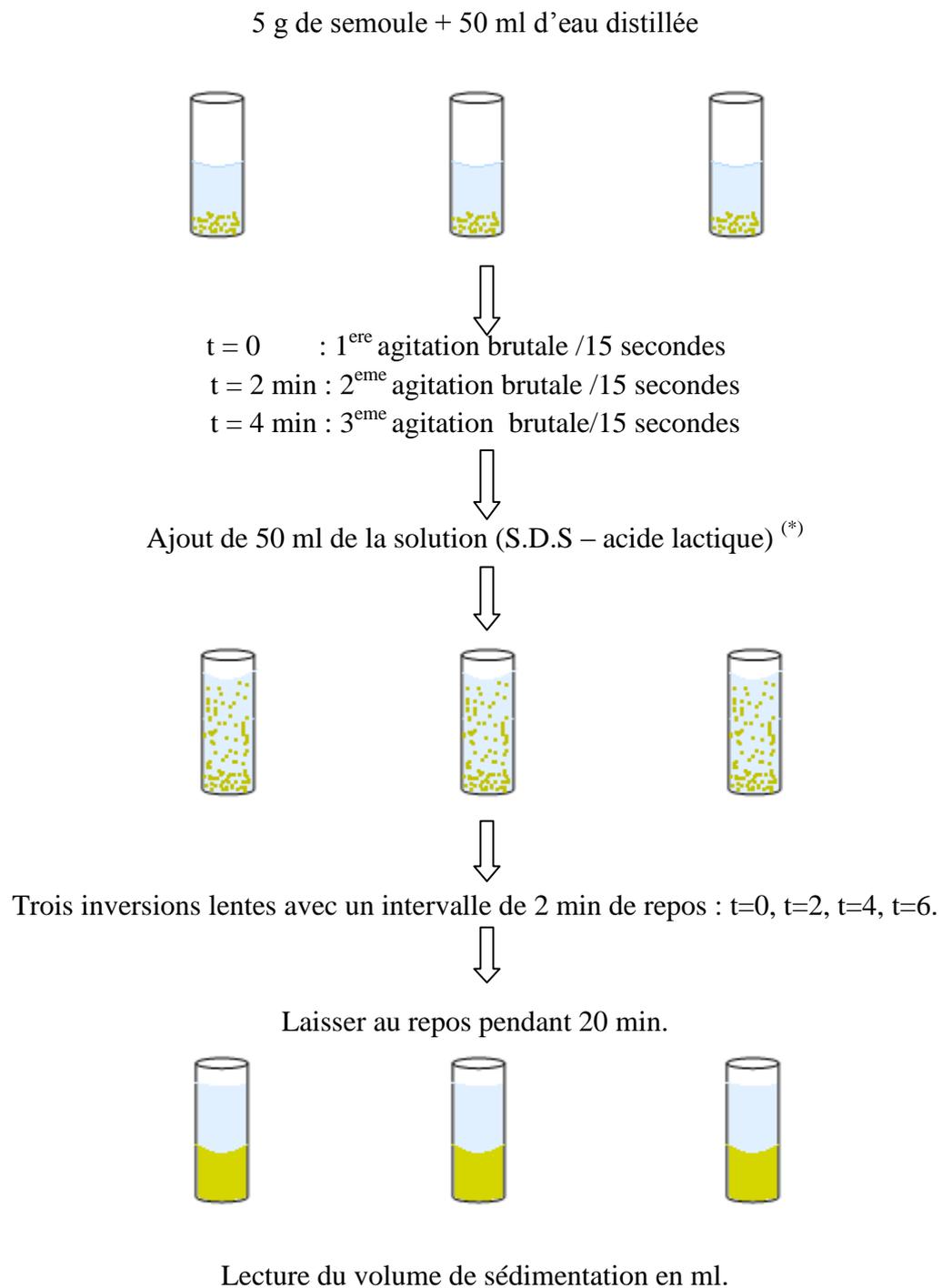
Avant de mettre en suspension la semoule, cette dernière est réduite grâce à un broyeur « KT » pour obtenir une granulométrie homogène de 155 μ m.

NB : A fin de démontrer l'influence de la granulométrie sur les résultats du test de sédimentation SDS, deux mesures ont été faites : dans la première, les échantillons n'ont pas été réduits (SDS1), et dans la seconde (SDS2), les fractions de mouture de blé dur ont été réduites par le broyeur « KT».

b- Expression des résultats

L'indice de sédimentation est représenté par le volume du dépôt exprimé en ml.

$$V \text{ (ml)} = \text{Volume du dépôt.}$$



(*) Solution S.D.S.- acide lactique : 1000 ml d'eau distillée + 20 ml d'acide lactique dilué à 80%+ 20 g S.D.S.

Figure 8 : Schéma du test de sédimentation en milieu SDS d'après la méthode d'AXFORD *et al.* (1979).

II.3.4 Essai au mixographe

Le mixographe est un appareil utilisé pour la mesure de la consistance de la pâte au cours du pétrissage, il a été effectué selon la norme **AACC : 54-40 A., (1983)**. Il constitue un test intéressant pour la détermination des propriétés rhéologiques de la pâte.

-Principe

10 g de semoule sont hydratés en fonction de leur teneur en protéines et ramenés à une humidité de 14% (selon les valeurs données en annexe 4). Le malaxage s'effectue dans le bol du mixographe et la plume est posée à la base de la feuille d'enregistrement se fait pendant 8 mn et les paramètres à étudier sont :

- temps de développement de la pâte (mixing time) exprimé en minutes, qui caractérise la force de la pâte;
- hauteur de la pente donnée en % (high of slope) qui correspond à la viscosité de la pâte;
- l'affaiblissement ou la tolérance au pétrissage qui est la différence entre la hauteur de la courbe au pic maximum et la hauteur de la courbe après 6 mn de pétrissage exprimé en % ;

Le calcul des paramètres se fait de la manière indiquée sur la figure 9.

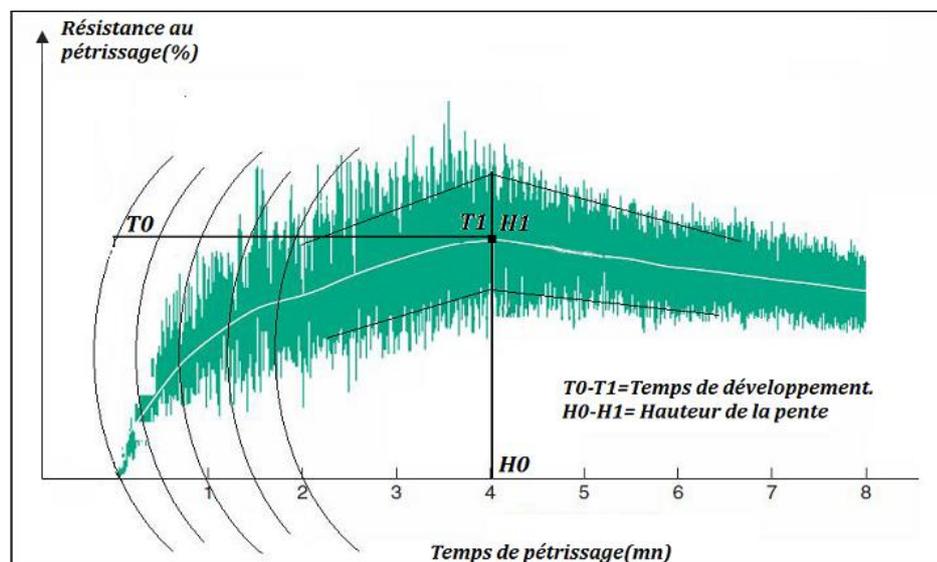


Figure 9 : Mixogramme d'un blé dur à gluten fort (Siméto) et ses paramètres (MEBTOUCHE, 1998).

Selon WILLIAMS *et al.* (1988), ces paramètres offrent la possibilité de classer les blés en fonction de leur force selon le « grading » en (annexe 5/1).

II.3.5 Essai à l'alvéographe Chopin

L'essai alvéographique de la semoule de blé dur a été réalisé selon le protocole de Barilla modifié (CHOPIN).

Cet appareil permet de déterminer la force boulangère d'une farine. Il mesure, sous pression, le travail de déformation d'une lamelle de pâte à hydratation constante.

La pâte, sous l'influence de la pression, gonfle et prend la forme d'une bulle qui grossit jusqu'à éclatement. La pression à l'intérieur de la bulle est enregistrée comme une courbe sur un support en papier et décrit un alvéogramme (figure 10). Une courbe moyenne est tracée à partir de l'enregistrement de 5 pâtons.

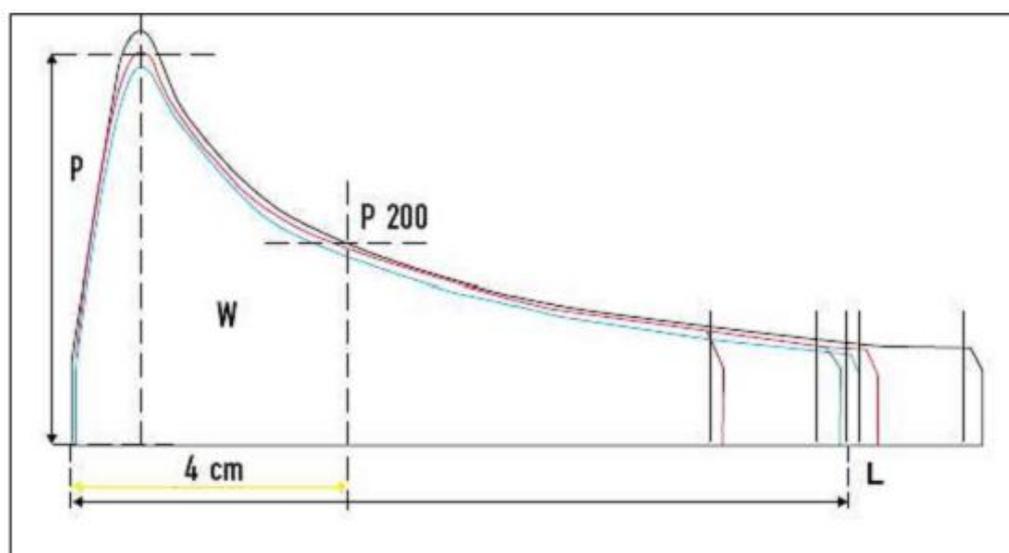


Figure 10 : Courbe alvéographique (DEL FRATE, 2005).

La lecture d'un alvéogramme (Figure 10) se fait à travers les paramètres suivants (NAEGA 2005) :

- Le "W" : Il vient du mot anglais "Work" et désigne le travail au sens physique du terme. Sa valeur est proportionnelle à la Surface (S) de la courbe obtenue selon l'équation suivante :

$$W \text{ (joules)} = 6,45 \times S$$

Cette grandeur exprime la force boulangère de la pâte.

- Le "P" : Correspond à la pression maximale d'air insufflée nécessaire à la déformation et donc à l'obtention de la bulle de pâte. Il exprime la ténacité de celle-ci et est donné en mm sur l'axe des ordonnées de l'alvéogramme.
- Le "L" : Ce paramètre correspond à l'extensibilité de la pâte depuis le début du gonflement jusqu'à éclatement de la bulle. Il indique l'élasticité de la pâte et l'allongement au façonnage. Il est donné en mm sur l'axe des abscisses de l'alvéogramme.
- Le "G" : Se rapporte au gonflement de la pâte qui est exprimé en cm³. Il est donné par l'équation suivante :

$$G \text{ (cm}^3\text{)} = 2,22 \times \sqrt{L}$$

- Le "P/L" : Ce rapport appelé "rapport de configuration de la courbe" ou "rapport de ténacité au gonflement", représente l'équilibre entre la ténacité et l'extensibilité de la pâte.
- Le "Ie" : Correspond à l'Indice d'Elasticité de la courbe. Il est donné par l'équation suivante:

$$Ie = (P_{200}/P_{\max}) \times 100 \text{ (KITISSOU, 1995).}$$

P₂₀₀ : Pression à 4 cm du début de la courbe.

Les valeurs caractéristiques moyennes pour la panification selon la norme I.S.O. 5530/04 sont regroupées en annexe 5/2.

QUAGLIA (1988) a constaté que pour fabriquer du pain à partir du blé dur, la semoule ou la farine doit avoir une bonne qualité de gluten (P/L alvéographique > 1,5, énergie W avoisinant ≈ 200 J x 10⁻⁴).

II.3.6 Essai au farinographe BRABENDER (NF. ISO 5530-1 :1997)

Il s'agit d'un pétrin de laboratoire qui permet de mesurer la consistance des pâtes au cours du pétrissage assuré par deux friseurs sigmoïdes tournant en sens inverse.

Le principe repose sur la détermination de quantité d'eau à ajouter à une farine pour former une pâte composée de farine d'eau à 30°C et ayant une consistance arbitraire de 500 Unité Farinographe (UF) en fin de pétrissage.

Les mesures sont réalisées à partir d'un pétrissage de 300g de farine à 14% d'humidité (voir tableau en annexe 3) donnant la masse (m) en fonction de la teneur en eau), la quantité d'eau

préalablement déterminée est ajoutée pour former la pâte dont on mesure la consistance, le développement, la stabilité et l'affaiblissement (Figure 11).

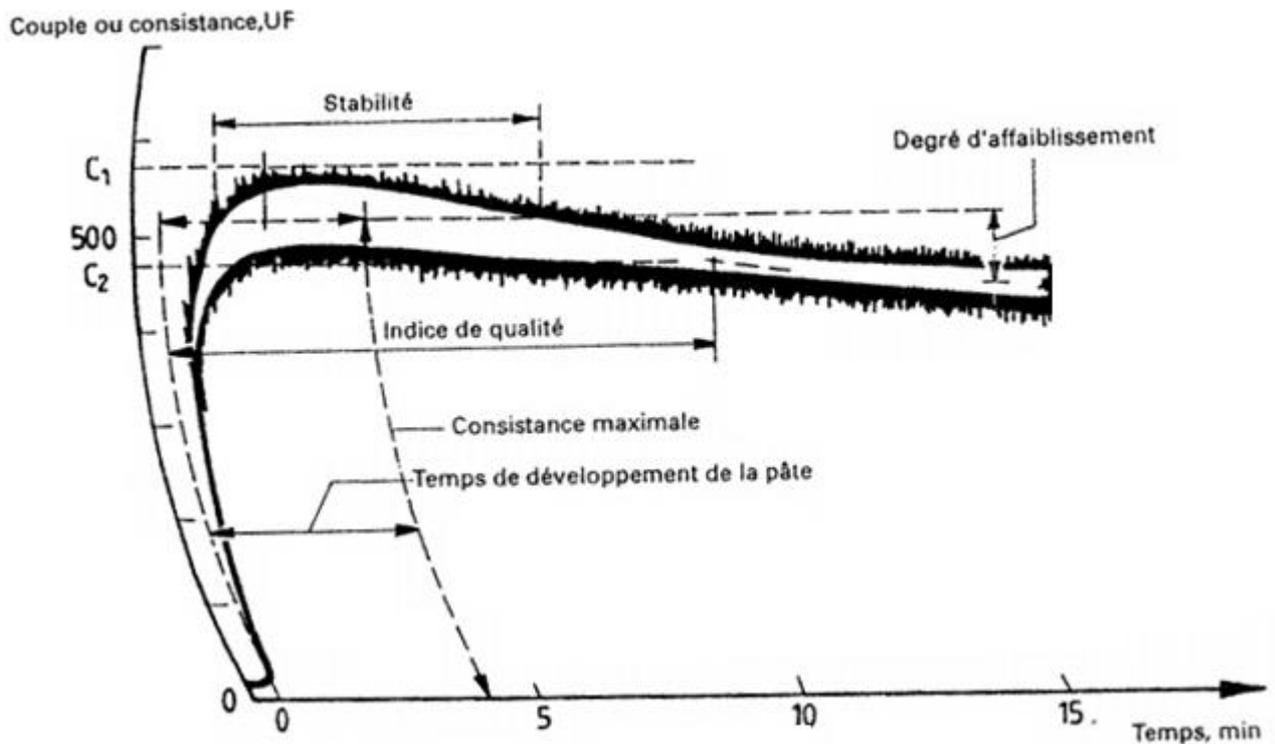


Figure 11 : Farinogramme représentatif montrant les indices communément mesurés (NF. ISO 5530-1)

- **Le temps de développement** en minutes : période qui s'écoule entre l'introduction de l'eau et le pic de consistance de la pâte. Il est influencé par la rapidité de la formation de la structure gluténique et la vitesse d'hydratation des particules de farine. Il augmente avec la teneur en protéines et avec une granulométrie plus grossière ;
- **La stabilité** s'est définie comme la différence en temps entre les deux points d'intersection de sommet de la courbe avec la droite 500 UF. Cette valeur est en générale indicatrice de tolérance de la pâte au pétrissage ;
- **Le degré d'affaiblissement de la pâte** est la différence de hauteur entre le centre de la courbe à la fin du temps de développement de la pâte et le centre de la courbe 12 minutes après ce point.

La capacité d'absorption d'eau est exprimée à 0,1 ml près, en millilitres pour 100 grammes de farine à 14 % de teneur en eau, le temps de développement et la stabilité sont exprimés en minutes à 0,5 minutes près, le degré d'affaiblissement est exprimé en Unité Farinographe à 5 UF près.

L'appréciation des paramètres farinographiques correspondant à une utilisation en panification française selon BERLAND et ROUSSEL (2005) est donnée en annexe 5/3.

III. ANALYSE STATISTIQUE

L'étude statistique a porté sur la détermination des coefficients de corrélations linéaires de **PEARSON « r »** à l'aide du logiciel SPSS version 19.

I. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

I.1 Sur les grains

Les principales caractéristiques physico-chimiques des échantillons de grains de blé dur prélevés sont données dans le tableau 9.

Tableau 9 : Caractéristiques physico-chimiques des grains de blé dur.

| Blés | Humidité (%MH) | Mitadinage (%) | Moucheture (%) | Protéines (%MS) | Cendres (%MS) | PMG (g) |
|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|---------|
| MIS 1 | 12,2 | 30,92 | 0,4 | 13,1 | 1,57 | 45,5 |
| LA BELLE | 12,8 | 8,83 | 0,75 | 15,5 | 1,61 | 44 |
| ERIAD | 13 | 18,25 | 0 | 15,1 | 1,53 | 43,2 |

NB : les grains de blé dur du complexe (MIS 2) n'ont pas été fournis.

-Les blés étudiés se caractérisent par des taux de moucheture faibles, des teneurs en cendre moyennes et des PMG élevés.

-Le blé du complexe (MIS 1) se caractérise par un taux de mitadinage très élevé (30,9%), avec un taux de protéines moyen (13,1%).

-Les blés des complexes (LA BELLE et ERIAD) se caractérisent par une teneur en protéines élevée (15,5 et 15,1%) respectivement, avec un taux de mitadinage élevé pour « ERIAD » et moyen pour « LA BELLE ».

I.2 Sur les semoules et farines de blé dur

I.2.1 Teneur en eau

La teneur en eau des farines et des semoules est un critère important pour leur conservation, ainsi que pour la réalisation des tests technologiques tels que l'alvéographe, le farinographe...

Sa détermination est indispensable puisqu'elle permet de rapporter les résultats analytiques à une même échelle de grandeur (% MS).

La teneur en eau des fractions de mouture de blé dur varie de 12,56 à 13,53% MH pour les farines avec une moyenne de $13,05 \pm 0,35\%$ et entre 12,61 et 13,73 % MH avec une moyenne de $13,23 \pm 0,55\%$ pour les semoules (tableau 10). Ces valeurs ne dépassent pas la valeur maximale de 14,5%, fixée par la norme Codex (178-1991) pour la semoule et la farine de blé dur.

I.2.2 Teneur en cendres

La teneur en cendres est un critère d'appréciation de la pureté des semoules, elle varie suivant le taux de cendres du blé mis en œuvre.

La teneur en cendres des semoules est inférieure à celle des farines (tableau 10). Elle se situe entre 0,76 % (3SE : MIS1) et 0,87 % MS (3SE : LA BELLE) avec une moyenne de $0,81 \pm 0,05\%$ MS. Ceci est en accord avec les données du J.O.R.A. (2007) qui fixe un maximum de 1% MS de cendres dans la semoule.

La teneur en cendres des farines de blé dur se situe entre 1,04 (3SF de MIS1) et 1,98 % MS (FPG de MIS 2) avec une moyenne de $1,45 \pm 0,32\%$. Elle s'élève dans le cas des farines issues des désagrégateurs pour atteindre le maximum dans les derniers prélèvements (DD3 et DD4). La 3SF ne dépasse pas la teneur en cendres maximale qui est de 1,75% MS fixée par le Codex (178-1991).

A l'intérieur de chaque groupe (fractions issues d'un même lot de blé), les farines centrales sont moins riches en cendres que les farines périphériques. En effet, des moyennes de $1,2 \pm 0,04\%$ MS pour les FCG et de $1,88 \pm 0,12\%$ MS pour les FPG sont obtenues. Ceci est en accord avec les résultats de HOULIAROPOULOS et *al.* (1981) qui ont constaté une augmentation du taux de cendres avec la progression de la mouture.

La 3SF a des valeurs intermédiaires entre la FCG et la FPG puisque elle représente le mélange de toutes les farines.

Les résultats obtenus sont probablement liés à l'origine histologique des échantillons prélevés. En effet, sur les premiers passages de la mouture et plus particulièrement sur les passages réduisant la semoule de l'amande centrale, les produits obtenus sont quasi purs (CUBADDA et *al.*, 2009). Au fur et à mesure de l'avancement des opérations, la mouture conduit à récupérer un produit de plus en plus minéralisé ; au niveau du désagrégateur qui traite les semoules vêtues, les

farines se contaminent par des éléments fins appartenant au son, plus on avance dans la mouture (WILLM et FOURRE, 1998).

BOYACIOGLU et D'APPOLONIA (1994a) ont observé que la teneur en matières minérales augmente en allant de l'albumen central vers l'albumen périphérique.

I.2.3 Taux d'affleurement

Le taux d'affleurement est l'appréciation de la composition en grosseur de la dimension des particules qui constituent la farine et la semoule.

Les résultats granulométriques des fractions de blé durs sont représentés dans le tableau 10 et illustrés par les figures 12, 13, 14, et 15 selon leur origine histologique.

La granulométrie des farines varie de 129 (3SE de LA BELLE) à 175,23 μm (FCG de MIS2) avec une moyenne de $166,98 \pm 13,43 \mu\text{m}$.

La granulométrie des farines semble varier très peu, avec des coefficients de dispersion proches de 1 à l'exception de la 3SF de « LA BELLE » qui a une granulométrie plus fine (129 μm). Entre MIS 1 et MIS 2, les valeurs de la granulométrie médiane (D50) sont proches, elles varient entre 170 et 175,2 μm . Pour « ERIAD », la (D50) varie entre 168 et 169,65 μm . Les résultats montre que la granulométrie diminue avec le nombre de passage à la mouture.

Dans l'ensemble, la granulométrie des fractions de farines étudiées est inférieure à 180 μm , ce qui correspond à la granulométrie d'une farine de blé tendre du fait que le taux de refus est inférieur à 10%.

Selon COLAS et PETEL (1984), la distribution granulométrique dépend de nombreux paramètres liés au blé (vitrosité et variété) et de la technologie mise en œuvre (conditionnement, types d'appareils, type de diagramme et taux d'extraction).

La semoule et la farine sont composées de particules de dimension et de composition variées et la qualité de nombreux dosages est influencée par la granulométrie de l'échantillon pour des raisons de surface accessible aux réactifs. Cependant, une granulométrie trop fine n'est pas recherchée, car elle entraîne une dégradation mécanique des constituants biochimiques (principalement l'endommagement de l'amidon).

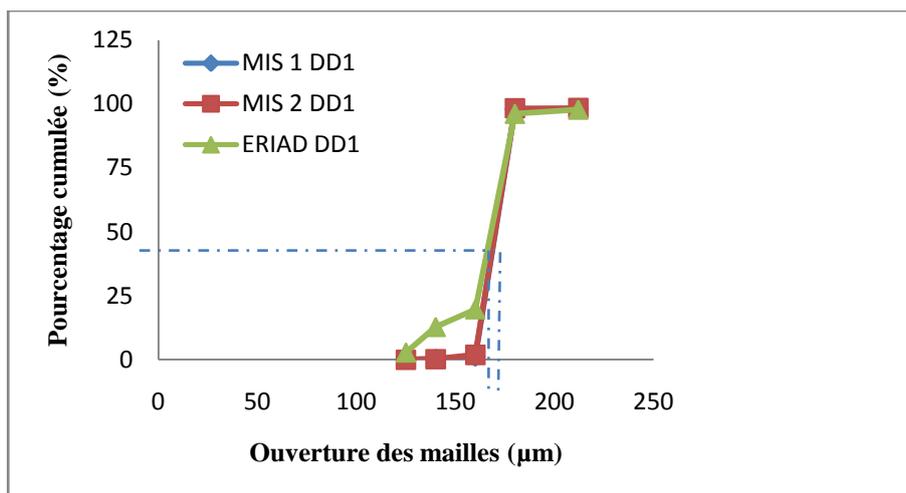


Figure 12 : Taux d'affleurement des farines centrales.

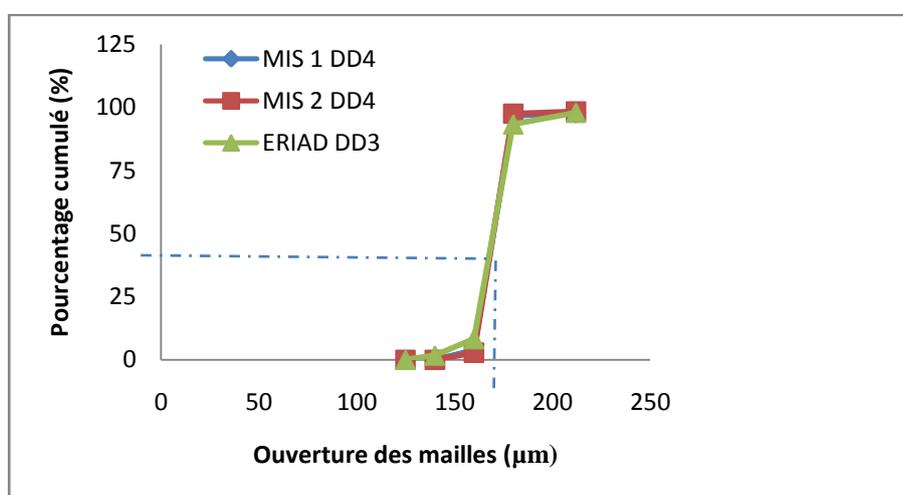


Figure 13: Taux d'affleurement des farines périphériques.

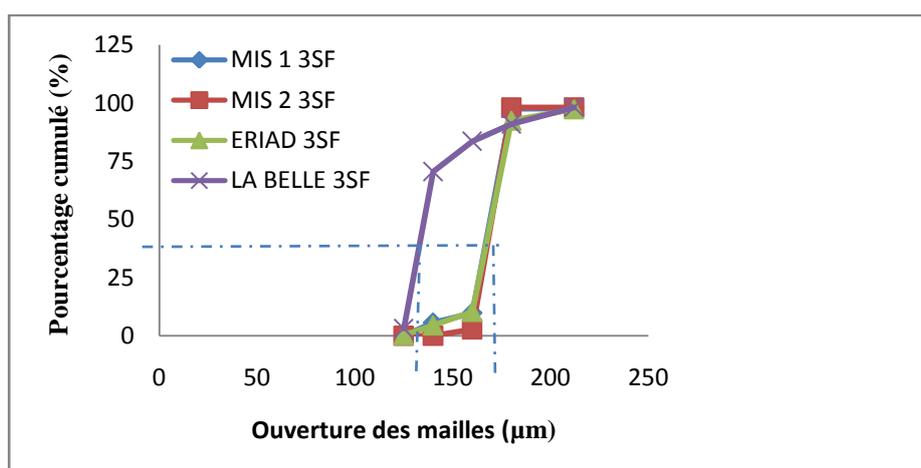


Figure 14 : Taux d'affleurement de la 3SF.

Les résultats de la granulométrie médiane (D50) des semoules varient de 186,5 à 211 µm avec une moyenne de $198 \pm 13,86$ µm et des coefficients de dispersion plus élevés, entre 1,23 et 1,34.

Les valeurs de la (D50) de MIS 1 et ERIAD sont proches et plus élevées avec 211,5 et 210,2 μm respectivement.

Les résultats obtenus sont proches de ceux donnés par QUAGLIA (1988) qui a constaté que la fabrication d'un pain de blé dur nécessite une farine/semoule ayant une granulométrie entre 120 et 190 μm , à l'exception de la 3SE de « MIS 1 » et « ERIAD » qui ont une granulométrie supérieure à 200 μm . QUAGLIA (1988) ajoute à cela que la granulométrie seule n'est pas suffisante, la teneur et la qualité des protéines ainsi que le taux d'endommagement de l'amidon jouent un rôle important dans l'obtention d'un bon pain.

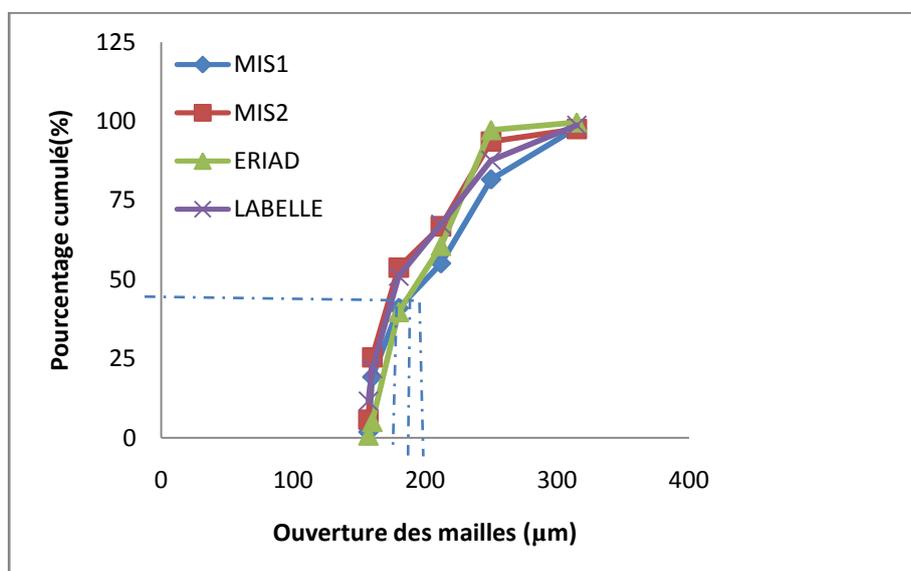


Figure 15: Taux d'affleurement des semoules.

La granulométrie de la semoule dépend de la dureté du blé ; plus la dureté du grain est grande, plus la granulométrie de la semoule sera élevée (ABECASSIS, 1987).

L'analyse statistique montre des corrélations négatives significatives entre la granulométrie des fractions et la teneur en cendre ($r = -0,617$) (tableau 11). Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par BOYACIOGLU et UNAL (1992) et DJEMA (2000).

La granulométrie des semoules influe sur la qualité de nombreux dosages ainsi que sur la qualité et la vitesse d'absorption d'eau, qui est fonction de la surface réactive et qui croît avec la finesse des particules.

Tableau 10 : Caractéristiques physico-chimiques des produits de mouture de blé dur.

| Fractions | Unités | H (%) | Cendres (%MS) | Granulométrie | | | Indices de coloration | |
|----------------------------------|-----------------|-------|---------------|---------------|----------|-------|-----------------------|--------|
| | | | | D50 (µm) | D84 (µm) | Sg | IJ | IB |
| FCG | MIS 1 | 13,53 | 1,15 | 174,83 | 177,11 | 1,01 | 10,45 | 9,33 |
| | MIS 2 | 12,78 | 1,22 | 175,23 | 177,35 | 1,01 | 12,11 | 10,5 |
| | ERIAD | 13,09 | 1,24 | 168,14 | 177,04 | 1,05 | 13,73 | 11,5 |
| | Moyenne | 13,13 | 1,2 | 172,73 | 177,16 | 1,02 | 12,09 | 10,44 |
| | Ecart-type | 0,37 | 0,04 | 3,98 | 0,16 | 0,02 | 1,64 | 1,0861 |
| FPG | MIS 1 | 12,97 | 1,92 | 171,51 | 180,3 | 1,05 | 12,35 | 11,53 |
| | MIS 2 | 12,56 | 1,98 | 170,2 | 178,34 | 1,04 | 13,87 | 11,75 |
| | ERIAD | 13,07 | 1,74 | 167,63 | 177,83 | 1,04 | 14,55 | 12,2 |
| | Moyenne | 12,86 | 1,88 | 169,78 | 178,82 | 1,04 | 13,59 | 11,82 |
| | Ecart-type | 0,27 | 0,12 | 1,97 | 1,30 | 0,005 | 1,12 | 0,341 |
| 3SF | MIS 1 | 13,42 | 1,04 | 170,12 | 178,23 | 1,04 | 11,15 | 10,48 |
| | MIS 2 | 12,54 | 1,38 | 171,25 | 177,1 | 1,03 | 13,04 | 10,45 |
| | ERIAD | 13,09 | 1,40 | 169,65 | 177,93 | 1,04 | 14,76 | 12,31 |
| | LA BELLE | 13,46 | 1,49 | 129,3 | 162,5 | 1,25 | 13,62 | 10,73 |
| | Moyenne | 13,12 | 1,32 | 160,08 | 173,94 | 1,09 | 13,14 | 10,99 |
| | Ecart-type | 0,42 | 0,19 | 20,5 | 7,64 | 0,10 | 1,50 | 0,88 |
| Moyenne/ farines (FCG, FPG, 3SF) | | 13,05 | 1,45 | 166,78 | 176,37 | 1,05 | 12,96 | 11,07 |
| Ecart-type | | 0,35 | 0,32 | 13,40 | 4,96 | 0,06 | 1,42 | 0,93 |
| 3SE | MIS 1 | 13,73 | 0,76 | 211,5 | 260,15 | 1,23 | 16,23 | 10,67 |
| | MIS 2 | 12,61 | 0,84 | 186,5 | 247,12 | 1,32 | 17,34 | 11,11 |
| | ERIAD | 12,93 | 0,78 | 210,2 | 245,18 | 1,16 | 22,58 | 14,05 |
| | LA BELLE | 13,67 | 0,87 | 187,2 | 252,1 | 1,34 | 19,04 | 13,53 |
| | Moyenne | 13,23 | 0,81 | 198,85 | 251,13 | 1,26 | 18,79 | 12,34 |
| | Ecart-type | 0,55 | 0,05 | 13,86 | 6,67 | 0,08 | 2,77 | 1,69 |

I.2.4 Indices de coloration

La coloration de la semoule est un critère important de la qualité des semoules de blé dur et de ses produits dérivés. Selon QUAGLIA, (1988), la coloration jaune ainsi que le goût et la durée de conservation représentent des paramètres importants de la qualité du pain de blé dur.

La coloration jaune de la semoule est due à la fois, à la présence dans le blé des pigments caroténoïdes et aux réactions enzymatiques responsables des dégradations oxydatives (BORRELLI et *al.*, 2008). Selon GAZZA et *al.* (2011), L'indice de brun et l'indice de jaune augmenteraient avec la dureté du blé.

-La valeur de l'indice de jaune (IJ) (tableau 10) des semoules est nettement supérieure à celle des farines de blé dur. Elle varie entre 16,23 et 22,58 avec une moyenne de $18,79 \pm 2,77$ et atteint le maximum pour la semoule de « ERIAD » avec une valeur de 22,58. Celle des farines varie de 10,45 à 14,76 avec une moyenne de $12,96 \pm 1,42$.

La différence de l'(IJ) entre les semoules et les farines peut s'expliquer par la différence de granulométrie (GAZZA et *al.*, 2011 ; FOIS et *al.*, 2011). En effet, les résultats du tableau 11 montrent des corrélations positives et significatives ($r=0,605$) entre ces deux paramètres (IJ et granulométrie).

Cependant, TRENTESAUX (1995) affirme qu'une semoule grosse paraît plus jaune que lorsqu'elle est finement broyée, alors que, la quantité de "pigments jaunes" extractibles reste invariable.

La différence de l'(IJ) entre semoules peut être d'origine variétale ou phénotypique (TRENTESAUX, 1995).

Les résultats du (tableau 10) montrent des (IJ) des semoules faibles, inférieures à 28 (HOULIAROPOULOS et *al.*, 1981) (annexe 2/1). Ceci pourrait s'expliquer par une perte des pigments caroténoïdes responsables de la coloration jaune par dégradation enzymatique (activité lipoxygénasique) au cours du stockage et après transformation du blé en semoule (BORRELLI et *al.*, 2003).

Selon BORRELLI et *al.* (2008), les pigments caroténoïdes sont distribués différenciellement dans le grain, leur gradient décroît dans le germe, les enveloppes et l'endosperme.

Pour les IB, les valeurs sont comprises entre 10,67 et 14,05 pour les semoules avec une moyenne de $12,34 \pm 1,69$ et entre 9,33 et 12,31 pour les farines avec une moyenne de $11,07 \pm 0,93$. Selon le classement de (HOULIAROPOULOS et al., 1981) (annexe 2/1) ces valeurs sont faibles (inférieures à 18).

Il ne semble pas y avoir une grande différence entre les semoules et les farines, mais les (IB) augmentent des premiers passages vers les derniers passages de mouture. Cette évolution est reliée au fait que les peroxydases et les polyphénoloxydases, en partie responsables du brunissement (FEILLET et al., 1974) sont localisées dans les régions périphériques, et diminuent en avançant vers le centre du grain (FRAIGNIER et al., 2000 ; BORRELLI et al., 2008).

Des corrélations positives hautement significatives sont observées entre l'IJ et l'IB ($r=0,818$) et entre l'indice de brun et les protéines ($r=0,775$) (tableau 11). Cette dernière corrélation a été observée par TIGROUDJA et BENDJOUADIOUADDA (1999).

HOULIAROPOULOS et al. (1981) ont trouvé des corrélations positives entre la teneur en cendres et l'IB, à l'inverse des résultats observés au tableau 11.

Tableau 11: Corrélations entre les analyses physico-chimiques des fractions de mouture de blé dur.

| | PROTEINES (%MS) | H% | CENDRES (%MS) | D50 (μm) | IJ | IB |
|-----------|-----------------|--------|---------------|-----------------------|---------------|----|
| PROTEINES | 1 | | | | | |
| H% | -0,137 | 1 | | | | |
| CENDRES | 0,401 | -0,388 | 1 | | | |
| D50 | -0,127 | 0,054 | -,617* | 1 | | |
| IJ | 0,48 | -0,001 | -0,501 | ,605* | 1 | |
| IB | ,775** | -0,06 | -0,086 | 0,347 | ,818** | 1 |

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).

II. ANALYSES BIOCHIMIQUES

II.1 Teneur en protéines totales

La teneur en protéines des farines et des semoules est un critère déterminant pour les propriétés technologiques des pâtes.

Les résultats des teneurs en protéines obtenues sur les différentes fractions de mouture de blé dur sont indiqués au niveau du tableau 12.

La teneur en protéines des fractions de farine varie de 10,38 à 14,08 % MS avec moyenne de $12,79 \pm 1,38\%$ MS. Ces résultats corroborent avec ceux trouvés par (BOYACIOGLU et D'APPOLONIA, 1994a) qui se situent entre 9,6 et 15% MS et ceux de (LINDHAL et ELIASSON, 1992) qui varient entre 9 et 15% MS. Le Codex (178-1991) exige une teneur minimale de 11%.

Cette teneur est atteinte dans la plupart des fractions, sauf pour les farines centrales (FCG) de « MIS 1 » et « MIS 2 », et la 3SF de « MIS 1 ». Selon TORBICA et *al.* (2011) les farines de blé dur peuvent atteindre jusqu'à 16% MS de protéines, ainsi, elles peuvent être utilisées en panification pour améliorer les propriétés des farines de blé tendre ayant des qualités technologiques médiocres.

Selon QUAGLIA (1988), la farine de blé dur doit avoir un taux de protéines minimal de 13% MS pour être apte à la panification.

Les valeurs des protéines dans le cas des farines périphériques sont supérieures à celle des farines du cœur du grain avec des moyennes de $13,72 \pm 0,45\%$ MS et $11,81 \pm 2,02\%$ MS respectivement. Ceci pourrait être lié aux procédés de mouture et à l'origine histologique des fractions (figure 16) ; le taux de protéines augmente des premiers vers les derniers passages de mouture, plus on s'oriente vers la périphérie, plus on se rapproche des enveloppes et des couches à aleurone riches en protéines.

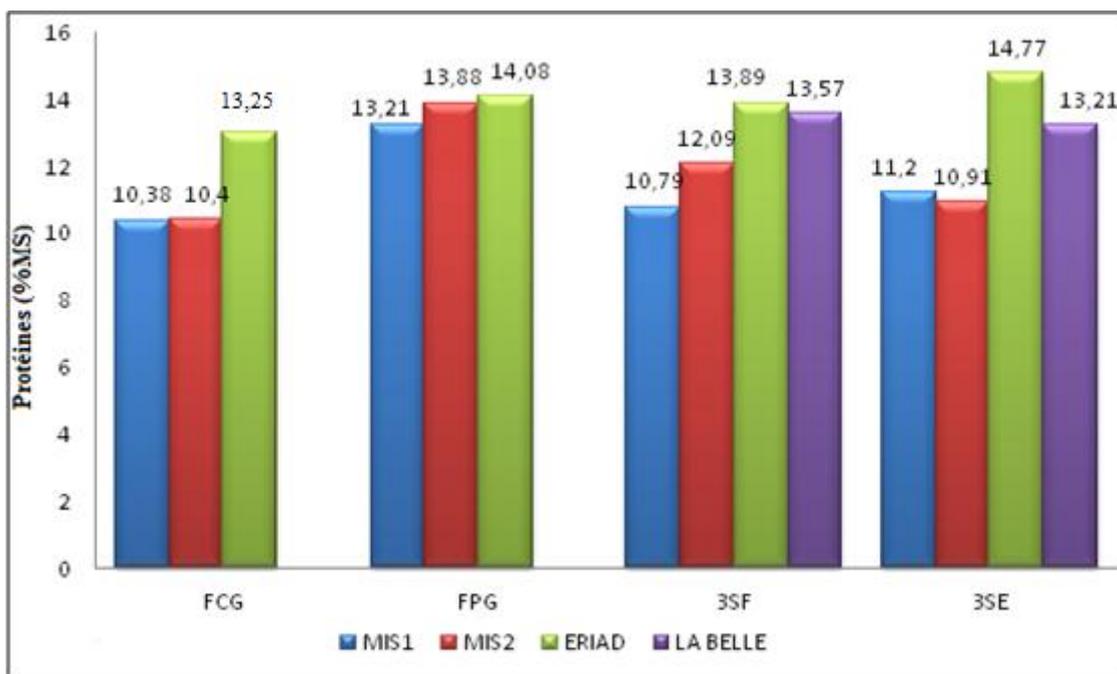


Figure 16 : Évolution de la teneur en protéines en fonction de l'origine histologique.

Quant aux semoules, la teneur en protéines varie de 10,91 à 14,77% MS avec une moyenne de $12,52 \pm 1,81\%$ %MS.

Ces valeurs sont dans l'ensemble supérieures à celles trouvées par (BOYACIOGLU et D'APPOLONIA, 1994a) qui ne dépassent pas les 12,5% MS, et proches de celles données par (IMPIGLIA et *al.*, 1995) et (TURNBULL, 2001) qui ont trouvé des teneurs en protéines totales des semoules de blé dur comprises entre (10,8 et 15,2% MS) et (11 et 16%) MS respectivement.

La différence entre les teneurs en protéines des semoules est due vraisemblablement au génotype et aux conditions de culture (pluviosité, fumure azotée...).

Tableau 12 : Teneur en protéines totales des fractions de mouture de blé dur (g/100g MS).

| Fractions | Unités | Protéines (g/100g MS) |
|----------------------------------|-----------------|------------------------------|
| FCG | MIS 1 | 10,38 |
| | MIS 2 | 10,40 |
| | ERIAD | 13,25 |
| | Moyenne | 11,81 |
| | Ecart-type | 2,02 |
| FPG | MIS 1 | 13,21 |
| | MIS 2 | 13,88 |
| | ERIAD | 14,08 |
| | Moyenne | 13,72 |
| | Ecart-type | 0,45 |
| 3SF | MIS 1 | 10,79 |
| | MIS 2 | 12,09 |
| | ERIAD | 13,89 |
| | LA BELLE | 13,57 |
| | Moyenne | 12,58 |
| | Ecart-type | 1,43 |
| Moyenne/ farines (FCG, FPG, 3SF) | | 12,79 |
| Ecart-type | | 1,38 |
| 3SE | MIS 1 | 11,2 |
| | MIS 2 | 10,91 |
| | ERIAD | 14,77 |
| | LA BELLE | 13,21 |
| | Moyenne | 12,52 |
| | Ecart-type | 1,81 |

II.2 Fractionnement par solubilité différentielle et dosage des fractions protéiques.

Les teneurs en protéines des différentes fractions protéiques obtenues par rapport aux protéines totales et par rapport à la matière sèche sont données dans le tableau 13 et l'annexe 6 respectivement.

II.2.1 Protéines monomériques (PM)

Elles représentent l'ensemble des gliadines, albumines et globulines.

Les teneurs en protéines monomériques des différentes fractions varient d'un échantillon de blé à un autre (tableau 13).

Pour les farines, les teneurs en protéines monomériques varient de 47,58 (3SF : LA BELLE) à 58,84% PT (FPG : MIS1) avec une moyenne de $52,71 \pm 3,81\%$ des protéines totales (PT). Elles augmentent en avançant dans la mouture (DD1 < DD3 et DD4). Ceci peut être dû à l'augmentation de la teneur en protéines totales. En effet, d'après WANG et al. (2007) la teneur en protéines monomériques augmente suivant l'évolution des protéines totales et la progression de la mouture en allant du convertisseurs 1, 2 puis 3.

Quant aux semoules, les protéines monomériques varient de 42,87 à 48,3% PT avec une moyenne de $45,68 \pm 2,78\%$ des protéines totales. Ces résultats sont moins élevés que ceux trouvés par (EDWARDS et al., 2003) et (SAPIRSTEIN et al., 2007) qui ont obtenu des moyennes de 55 % et 53%PT respectivement.

II.2.2 Gluténines solubles (GS)

Les teneurs en gluténines solubles des farines de blé dur varient de 12,35% (FPG : ERIAD) à 17,2% PT (FCG : MIS2) avec une moyenne de $13,92 \pm 1,74\%$ des protéines totales. Ces valeurs sont variables selon l'origine histologique et diminuent avec l'avancement de la mouture (moyenne de $14,62 \pm 2,74\%$ MS pour la FCG et $13,95 \pm 1,58\%$ MS pour la FPG). La 3SF présente des valeurs intermédiaires avec une moyenne de $13,37 \pm 1,29\%$ MS) (tableau 13).

Les valeurs des gluténines solubles dans le cas des semoules varient de 13,19 (3SE : MIS1) à 14,97%PT (3SE : MIS2) avec une moyenne de $14,39 \pm 0,81\%$ des protéines totales. Ces valeurs sont proches de celles trouvées par (MAGHIRANG et al., 2006) (11,5-18,4%PT).

II.2.3 Gluténines insolubles (GI)

Les gluténines insolubles = SG-HPM + SG-FPM.

Pour les farines de blé dur, les valeurs sont comprises entre 16,48 et 26,92% PT avec une moyenne de $20,84 \pm 2,8\%$ des protéines totales (tableau 13). Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées dans les semoules qui varient de 23,79 à 29,99% des PT avec une moyenne de $25,84 \pm 2,8\%$ des protéines totales.

SAPIRSTEIN et *al.* (2007) rapportent des valeurs plus faibles (17 à 23,6%PT) dans le cas des semoules.

Les teneurs en protéines des SG-HPM et SG-FPM insolubles diminuent dans l'ensemble avec l'avancement de la mouture. Ceci a été observé par (WANG et *al.*, 2007) sur les farines de blé tendre allant du premier au 3^{ème} convertisseur.

- ✓ Les teneurs en protéines des SG-HPM insolubles varient de 3,01 à 4,92 %PT avec une moyenne de $3,86 \pm 0,56\%$ pour les farines et de 3,64 à 4,08%PT avec une moyenne de $3,86 \pm 0,23\%$ PT pour les semoules.
- ✓ Les teneur en protéines des SG-FPM insolubles varient de 12,65 à 23,32% PT avec une moyenne de $16,98 \pm 2,75\%$ des protéines totales pour les farines de blé dur, et de 20,11 à 25,91% PT avec une moyenne de $21,98 \pm 2,66\%$ des protéines totales pour les semoules. Ces valeurs sont supérieures à celles des farines de blé dur (tableau 13).

II.2.4 Gluténines totales (GT)

Les gluténines totales (GT) = gluténines solubles (GS) + gluténines insolubles (GI)

Les gluténines totales des farines de blé dur ont des valeurs allant de 30,48 (FPG : MIS 1) à 41,44% PT (3SF : LA BELLE) avec une moyenne de $34,77 \pm 3,23\%$ PT et diminuent avec l'avancement de la mouture. Celles des semoules sont plus élevées, elles varient de 36,98 (MIS 1) à 44,54% PT (ERIAD) avec une moyenne de $40,23 \pm 3,14\%$ des protéines totales. Ces valeurs sont proches de celles rapportées par (EDWARDS et *al.*, 2003) qui sont comprises entre 37,5 et 50,8% PT dans le cas des semoules (tableau 13).

II.2.5 Résidu insoluble

Les valeurs varient en général en fonction de la teneur en protéines totales. Les teneurs sont comprises entre 9,92 et 15,62% PT pour les farines et entre 11,42 et 14,42% PT pour les semoules avec une valeur maximale pour « ERIAD » qui est de 14,42% PT.

II.2.6 Protéines polymériques (Pr. POL)

Les protéines polymériques = gluténines solubles (GS) + gluténines insolubles (GI) + Résidu insoluble (RI)

Les valeurs des protéines polymériques des farines de blé dur varient de 43,25 (3SF : MIS 1) à 51,73% PT (FCG : MIS 2) avec une moyenne de $48,47 \pm 2,74\%$ des protéines totales. Elles sont inférieures à celles des semoules qui sont comprises entre 48,4 (MIS 1) et 58,96% (ERIAD) avec une moyenne de $52,66 \pm 4,47\%$ des protéines totales (tableau 13). Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées par (MAGHIRANG et *al.*, 2006) (51,7-52,5% PT).

II.3 Ratios des fractions protéiques

Le tableau 14 donne les résultats des ratios des fractions protéiques obtenus sur les différents échantillons étudiés.

II.3.1 Protéines monomériques/Protéines polymériques

Le ratio PM/P.POL est plus élevé dans le cas des farines, il varie de 0,92 (3SF : LA BELLE) à 1,34 (3SF : MIS 1) avec une moyenne de $1,09 \pm 0,12$ et entre 0,72 (ERIAD) et 0,98 (MIS 1) pour les semoules avec une moyenne de $0,87 \pm 0,11$ (tableau 14).

II.3.2 SG-FPM/ SG-HPM Ins.

Le ratio SG-FPM/SG-HPM varie de 3,3(FPG : MIS 1) à 6,47 (3SF : LA BELLE) avec une moyenne de $4,47 \pm 0,93$ pour les farines, il est plus élevé dans le cas des semoules et se situe entre 5,09 (LA BELLE) et 6,34 (ERIAD) avec une moyenne de $5,68 \pm 0,53$ (tableau 14).

Tableau 13 : Teneurs en protéines des différentes fractions de mouture de blé dur (% PT).

| Fractions | Unités | PT | PM | GS | GI | | | RI | GT | Pr.POL |
|------------------|-----------------|-------|-------|-------|--------|--------|----------|-------|-------|--------|
| | | | | | SG-HPM | SG-FPM | Total GI | | | |
| FCG | MIS 1 | 10,38 | 48,63 | 14,94 | 3,01 | 16,1 | 19,11 | 11,44 | 34,05 | 45,49 |
| | MIS 2 | 10,40 | 49,71 | 17,2 | 3,66 | 17,59 | 21,25 | 13,28 | 38,45 | 51,73 |
| | ERIOD | 13,25 | 52,21 | 11,74 | 4,92 | 18,33 | 23,25 | 15,02 | 34,99 | 50,01 |
| | Moyenne | 11,81 | 50,18 | 14,62 | 3,86 | 17,34 | 21,20 | 13,24 | 35,83 | 49,07 |
| | Ecart-type | 2,02 | 1,83 | 2,74 | 0,97 | 1,13 | 2,07 | 1,79 | 2,31 | 3,22 |
| FPG | MIS 1 | 13,21 | 58,84 | 14 | 3,83 | 12,65 | 16,48 | 15,5 | 30,48 | 45,98 |
| | MIS 2 | 13,88 | 55,09 | 15,51 | 3,58 | 15,66 | 19,24 | 15,62 | 34,75 | 50,37 |
| | ERIOD | 14,08 | 54,5 | 12,35 | 4,65 | 16,66 | 21,31 | 15,48 | 33,66 | 49,14 |
| | Moyenne | 13,72 | 56,14 | 13,95 | 4,02 | 14,99 | 19,01 | 15,53 | 32,96 | 48,49 |
| | Ecart-type | 0,45 | 2,35 | 1,58 | 0,58 | 2,08 | 2,42 | 0,07 | 2,21 | 2,26 |
| 3SF | MIS 1 | 10,79 | 57,99 | 11,62 | 3,87 | 15,5 | 19,37 | 12,26 | 30,99 | 43,25 |
| | MIS 2 | 12,09 | 51,18 | 13,81 | 3,43 | 18,04 | 21,47 | 13,5 | 35,28 | 48,78 |
| | ERIOD | 13,89 | 51,38 | 13,55 | 4,11 | 15,95 | 20,06 | 15,04 | 33,61 | 48,65 |
| | LA BELLE | 13,57 | 47,58 | 14,52 | 3,6 | 23,32 | 26,92 | 9,92 | 41,44 | 51,36 |
| | Moyenne | 12,58 | 52,03 | 13,37 | 3,75 | 18,20 | 21,95 | 12,68 | 35,33 | 48,01 |
| | Ecart-type | 1,43 | 4,33 | 1,23 | 0,29 | 3,58 | 3,42 | 2,16 | 4,43 | 3,40 |
| Moyenne/ farines | | 12,79 | 52,71 | 13,92 | 3,86 | 16,98 | 20,84 | 13,70 | 34,77 | 48,47 |
| Ecart-type | | 1,38 | 3,81 | 1,74 | 0,56 | 2,75 | 2,80 | 1,98 | 3,233 | 2,74 |
| 3SE | MIS 1 | 11,2 | 47,85 | 13,19 | 3,68 | 20,11 | 23,79 | 11,42 | 36,98 | 48,4 |
| | MIS 2 | 10,91 | 48,3 | 14,97 | 3,64 | 21,26 | 24,9 | 11,49 | 39,87 | 51,36 |
| | ERIOD | 14,77 | 42,87 | 14,55 | 4,08 | 25,91 | 29,99 | 14,42 | 44,54 | 58,96 |
| | LA BELLE | 13,21 | 43,71 | 14,85 | 4,05 | 20,65 | 24,7 | 12,38 | 39,55 | 51,93 |
| | Moyenne | 12,52 | 45,68 | 14,39 | 3,86 | 21,98 | 25,84 | 12,42 | 40,23 | 52,66 |
| | Ecart-type | 1,81 | 2,789 | 0,81 | 0,23 | 2,66 | 2,80 | 1,39 | 3,14 | 4,47 |

Tableau 14: Ratios des fractions protéiques des produits de mouture de blé dur.

| Fractions | Unités | PM/Pr. POL | SG-FPM/SG-HPM Ins. |
|------------------|-----------------|------------|--------------------|
| FCG | MIS 1 | 1,06 | 5,34 |
| | MIS 2 | 0,96 | 4,80 |
| | ERIAD | 1,04 | 3,72 |
| | Moyenne | 1,02 | 4,62 |
| | Ecart-type | 0,05 | 0,82 |
| FPG | MIS 1 | 1,27 | 3,30 |
| | MIS 2 | 1,09 | 4,37 |
| | ERIAD | 1,10 | 3,58 |
| | Moyenne | 1,16 | 3,75 |
| | Ecart-type | 0,03 | 0,41 |
| 3SF | MIS 1 | 1,34 | 4,00 |
| | MIS 2 | 1,04 | 5,25 |
| | ERIAD | 1,05 | 3,88 |
| | LA BELLE | 0,92 | 6,47 |
| | Moyenne | 1,09 | 4,9 |
| | Ecart-type | 0,07 | 1,27 |
| Moyenne/ farines | | 1,09 | 4,47 |
| Ecart-type | | 0,12 | 0,93 |
| 3SE | MIS 1 | 0,98 | 5,46 |
| | MIS 2 | 0,94 | 5,84 |
| | ERIAD | 0,72 | 6,35 |
| | LA BELLE | 0,84 | 5,09 |
| | Moyenne | 0,87 | 5,68 |
| | Ecart-type | 0,11 | 0,53 |

III. ANALYSES TECHNOLOGIQUES

III.1 Teneur en gluten

Les caractéristiques rhéologiques du gluten conditionnent en général pour une large part la qualité technologique des semoules et des blés, ainsi que leur utilisation industrielle et leur valeur commerciale.

Les résultats obtenus sur le gluten des différentes fractions étudiées sont regroupés dans le tableau 15.

III.1.1 Gluten humide (GH)

Selon GRESLE (2000), le gluten humide conditionne la valeur technologique d'un blé.

Les farines de blé dur présentent des valeurs comprises entre 20,8 (FCG : MIS 2) et 31,32% MH (FCG : LA BELLE) avec une moyenne de $25,37 \pm 3,67$ % MH. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans la (3SF) avec une moyenne de $27,78 \pm 3,71$ % MH suivie des (FPG) avec une moyenne de $24,93 \pm 3,58$ % MH. Les valeurs du gluten humide de MIS1 semblent être les plus faibles contrairement à celles de l'ERAD qui sont les plus élevées.

Les teneurs en GH des semoules sont plus élevées que celles des farines. Elles varient de 25,86 à 31,42% MH avec une moyenne de $28,32 \pm 2,85$ % MH. Celles de « LA BELLE » et « ERAD » sont plus élevées avec 30,08 et 31,42% MH respectivement.

En fonction de la teneur en gluten humide, GRESLE (2000) a classé les farines de blé tendre comme suit :

-GH<22% : gluten à caractère soft, utilisation biscuiterie, 23%<GH<26% : boulangerie et GH>26% panification spéciale.

III.1.2 Gluten sec (GSc)

Les fractions de farines ont des teneurs en gluten sec (GSc) comprises entre 8,4 (FCG : MIS 1) et 12,05% MS (3SF : LA BELLE) avec une moyenne de $10,03 \pm 1,34$ % MS. Les teneurs en GS s'élèvent avec l'avancement de la mouture. En effet, les farines centrales (FCG) présentent des

teneurs plus faibles que les farines périphériques (FPG) avec des moyennes de $8,98 \pm 1,03\%$ MS et $9,92 \pm 1,12\%$ MS respectivement. La 3SF présente les valeurs les plus élevées avec $10,91 \pm 1,32\%$ MS.

Ces valeurs rejoignent celles obtenues par DUBOIS (1996) qui préconise une teneur en GSc comprise entre 8 et 13% pour une farine panifiable.

Les semoules contiennent entre 9,35 (3SE : MIS2) et 12,5% MS (3SE : ERIAD) de gluten sec, avec une moyenne de $10,78 \pm 1,58\%$ MS. Ces résultats sont proches de ceux trouvés par (TIGROUDJA et BENDJOUDIQUDDA, 1999) qui varient de 9,06 à 14,23% MS.

En Italie, la teneur en gluten sec ne doit pas dépasser 11% pour la fabrication du pain de blé dur « Matera bread » (I. P. Z. S., 2004. In : PASQUALONE et *al.*, 2004).

Les teneurs en gluten humide et sec augmentent avec l'avancement de la mouture. Ces variations pourraient être expliquées par la distribution hétérogène des protéines du gluten : les farines de la périphérie sont plus riches que celles du cœur du grain (ABECASSIS, 1991).

Quant à l'extractibilité du gluten : (teneur en gluten sec/teneur en protéines) x 100, elle diminue régulièrement avec l'avancement de la mouture pour atteindre des valeurs très faibles dans les derniers désagrégateurs. Ces observations rejoignent celles de HOULIAROPOULOS et *al.* (1981).

III.1.3 Gluten index (GIx)

Le gluten index peut être utilisé comme un test prédictif et rapide de la qualité pastière et de la qualité boulangère des blés durs (RANHOTRA et *al.*, 1992).

Les valeurs du gluten index des farines de blé dur présentent une grande variation selon leur origine histologique. Elles oscillent entre 34,51 (FPG : ERIAD) et 63,62% (FCG : MIS 1) avec une moyenne de $53,25 \pm 12,46\%$.

Les valeurs du GIx des farines de la 3SF sont les plus élevées avec une moyenne de $59,99 \pm 10,74$. Le GIx des farines centrales (FCG) est plus élevé que celui des farines périphériques (FPG) avec des moyennes de $58,39 \pm 8,68$ et $39,13 \pm 4,58\%$ respectivement, et ce

malgré leur faible teneur en protéines (figure 17). Ceci indique que la quantité des protéines n'est pas un critère suffisant pour prédire la force du gluten.

Les teneurs en gluten index des semoules sont plus élevées, allant de 52,47 à 81,59% avec une moyenne de 69,57%±13,65%. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées pour « LA BELLE » et « ERIAD », avec 79,52 et 81,59% respectivement.

Sur la base des travaux de CUBADA et CARCEA (1994) regroupés en (annexe 2/2), la majorité des fractions contient un gluten à force moyenne avec un gluten index compris entre 35 et 65%, sauf pour la (3SF) et (3SE) de « ERIAD » ainsi que la 3SE de « LA BELLE » qui ont un gluten fort dépassant les 65%.

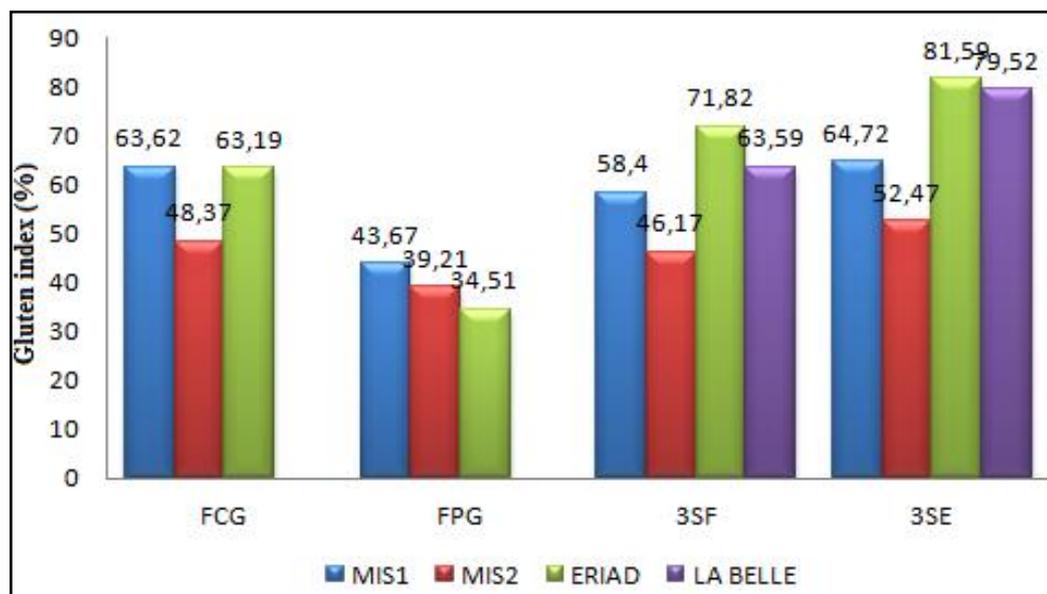


Figure 17: Valeurs du gluten index (%) en fonction de l'origine histologique du blé.

Pour la fabrication du pain de blé dur, le journal officiel européen (European Union, 2003) fixe une valeur limite de 80% pour le gluten index. Nos échantillons ont des valeurs inférieures à cette dernière, sauf pour la (3SF : ERIAD) qui atteint 81,59%.

III.2 Détermination de l'indice de chute HAGBERG PERTEN (IC)

Le tableau 15 donne les différents résultats des indices de chutes obtenus sur les différentes fractions de mouture de blé dur.

L'indice de chute est un indicateur de l'activité α -amylasique et rend compte du degré d'hydrolyse de l'amidon en sucres simples fermentescibles.

La mesure de l'activité enzymatique révèle non seulement la présence de grains germés, mais aussi, elle contribue à la qualité du pain : volume du pain, aspect de la mie, couleur de la croûte et dégagement gazeux au cours de la fermentation (BARD, 1997).

Les valeurs de l'indice de chute de la 3SF sont les plus élevées parmi les farines avec une moyenne $622,25 \pm 215,19$ sec, suivies de celles de farines périphériques (FPG) et des farines centrales (FCG) avec des moyennes de $566,25 \pm 211,89$ sec et $503,66 \pm 193,52$ sec respectivement.

Quant aux semoules, les valeurs varient de 359 à 974 sec, avec une moyenne de 629 ± 254 sec. Ces valeurs diffèrent d'un échantillon à un autre et sont plus élevées dans le cas des fractions de mouture de « ERIAD » et « LABELLE ». Selon JEANTET et *al.* (2007), l'activité amylasique dépend des conditions climatiques jusqu'à la récolte et des conditions de conservation après la récolte. En effet, un blé humide passe très rapidement à la prégermination et la germination, conduisant au développement des activités enzymatiques, qui, à un stade avancé de la dégradation, le blé ne devient plus panifiable.

Sur la base du classement de BARD (1997) donné en (annexe 2/3), nos fractions (farines/semoules) sont hypo-diastasiques, ce qui signifie une faible activité amylasique, puisque les valeurs de l'indice de chute dépassent les 300 sec dans tous les échantillons. Ainsi, l'activité amylasique ne correspond pas aux valeurs préconisées pour la panification, qui sont comprises entre 180 et 300 (BARD, 1997) et 180-280 (J.O.R.A., 1992).

A l'exception des valeurs de l'indice de chute de LA BELLE et ERIAD qui sont élevées, les autres valeurs sont de même ordre de grandeur que celles rapportées par BOYACIOGLU et D'APPOLONIA (1994a) qui varient de 400-570sec pour les farines de blé dur et celles de RAO et *al.* (2001) : 385-505 sec et GAZZA et *al.* (2011) 467-553sec, pour les semoules de blé dur.

Les résultats obtenus pourraient s'expliquer par la pauvreté des différents échantillons de blé dur en amylases. Ceci pourrait être corrigé par l'addition de malt des céréales ou d' α -amylase fongique mais dans les limites fixées par la législation en vigueur (DUBOIS, 1996).

III.3 Indice de sédimentation SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)

Le test SDS est un indicateur de la qualité des protéines et la force des blés durs.

Les résultats du test de sédimentation SDS (SDS1 et SDS2) obtenus sur nos échantillons sont représentés sur le tableau 15.

Les volumes de sédimentations (SDS1) enregistrés avant réduction au moulin KT varient de 29 à 38 ml pour les farines de blé dur, avec une moyenne de $32,35 \pm 3,3$ ml. Les valeurs les plus élevées étant celles de « MIS1 » suivies de « MIS2 » avec des moyennes de 35,8 et 32,83 ml respectivement.

Quant aux semoules, les volumes enregistrés sont plus faibles et moins variables que ceux obtenus pour les farines, avec des valeurs allant de 17,5 à 18,5 ml et une moyenne de $18 \pm 0,57$ ml. Ces valeurs sont en accord avec celles trouvées par LADRAA (2012) et AMMOUCHE (2002) mais inférieures à celles de DJEMA (2000), OKANDZA (2000) et AIT SIDHOUM et BENDJABEUR (2009).

Après réduction des échantillons par le moulin KT, les volumes de sédimentation augmentent et passent d'une moyenne de $31,5 \pm 3,3$ à $34,5 \pm 3,7$ ml pour les farines, et de $18 \pm 0,55$ à $19,75 \pm 1,9$ ml pour les semoules, soit un accroissement de 9,52% et 9,72% respectivement. Les farines de la « 3SF » présentent les volumes de sédimentation les plus élevés que ce soit avant ou après réduction par le moulin KT.

Cette différence entre les résultats pourrait être expliquée par le fait que ce test est très influencé par la granulométrie des produits (OKANDZA, 2000).

En effet, les résultats montrent que la granulométrie a un effet significatif sur le test de sédimentation : plus la granulométrie augmente, moins le volume est important, ce qui explique les corrélations négatives entre la D50 et le test SDS (tableau 17).

Les farines/semoules de blé dur se caractérisent par des volumes de sédimentation moins élevés que ceux des farines de blé tendre ; la force du gluten dans le cas des farines de blé dur tend à devenir plus faible (LIU et *al.*, 1996).

ROYO et *al.* (2009) ont classé les variétés de blé dur en fonction de leur volume de sédimentation comme suit :

Volume SDS <30 : gluten faible.

Volume SDS \geq 35 : indique un gluten fort.

Selon WILLIAMS et *al.* (1988), des volumes de sédimentation compris entre 30 et 39 ml caractérisent les blés durs faibles. Pour les farines de blé tendre, un volume inférieur à 60 ml caractérise une force boulangère médiocre (PAYNE et *al.*, 1979).

D'une manière générale, les résultats du test SDS montrent que la majorité des échantillons se caractérise par un gluten faible.

PENA (2000) a trouvé une corrélation hautement significative entre le test SDS et le volume du pain de blé dur ($r=0,45$).

Tableau 15: Caractéristiques technologiques des différentes fractions de mouture étudiées.

| Fractions | Unités | GLUTEN | | | | IC (sec) | SDS 1 (ml) | SDS 2 (ml) |
|------------------|-----------------|----------|----------|--------|--------------------|----------|------------|------------|
| | | GH (%MH) | GS (%MS) | GIx(%) | Extractibilité (%) | | | |
| FCG | MIS 1 | 21,39 | 8,40 | 63,62 | 80 | 312 | 36,5 | 37,5 |
| | MIS 2 | 20,80 | 8,37 | 48,37 | 80 | 500 | 31,5 | 33 |
| | ERIAD | 25,62 | 10,17 | 63,19 | 76 | 699 | 29,5 | 33,5 |
| | Moyenne | 22,60 | 8,98 | 58,39 | 78,66 | 503,66 | 32,5 | 34,66 |
| | Ecart-type | 2,62 | 1,03 | 8,68 | 2,30 | 193,52 | 3,60 | 2,46 |
| FPG | MIS 1 | 21,09 | 8,63 | 43,67 | 65 | 347 | 33 | 40 |
| | MIS 2 | 25,54 | 10,69 | 39,21 | 77 | 581 | 32,5 | 37,5 |
| | ERIAD | 28,18 | 10,45 | 34,51 | 74 | 770 | 29 | 30,5 |
| | Moyenne | 24,93 | 9,92 | 39,13 | 72 | 566 | 31,5 | 36 |
| | Ecart-type | 3,58 | 1,12 | 4,58 | 6,24 | 211,89 | 2,17 | 4,92 |
| 3SF | MIS 1 | 23,42 | 9,22 | 58,40 | 85 | 348 | 38 | 41 |
| | MIS 2 | 26,02 | 10,51 | 46,17 | 86 | 552 | 34,5 | 40 |
| | ERIAD | 30,38 | 11,87 | 71,82 | 85 | 805 | 27,5 | 31,5 |
| | LA BELLE | 31,32 | 12,05 | 63,59 | 88 | 784 | 31,5 | 34,5 |
| | Moyenne | 27,78 | 10,91 | 59,99 | 86 | 622,25 | 32,87 | 36,75 |
| | Ecart-type | 3,71 | 1,32 | 10,74 | 1,41 | 215,79 | 4,46 | 4,51 |
| Moyenne/ farines | | 25,37 | 10,03 | 53,25 | 79,6 | 569,8 | 32,35 | 35,9 |
| Ecart-type | | 3,76 | 1,34 | 12,46 | 6,94 | 191,07 | 3,30 | 3,79 |
| 3SE | MIS 1 | 25,94 | 9,52 | 64,72 | 85 | 359 | 18,5 | 22,5 |
| | MIS 2 | 25,86 | 9,35 | 52,47 | 85 | 604 | 17,5 | 19 |
| | ERIAD | 31,42 | 12,5 | 81,59 | 84 | 579 | 18,5 | 19,5 |
| | LA BELLE | 30,08 | 11,76 | 79,52 | 89 | 974 | 17,5 | 18 |
| | Moyenne | 28,32 | 10,78 | 69,57 | 85,75 | 629 | 18 | 19,75 |
| | Ecart-type | 2,85 | 1,58 | 13,65 | 2,21 | 254,98 | 0,57 | 1,93 |

SDS1 : volumes de sédimentation (mm) obtenus avant réduction des échantillons par le moulin KT.

SDS2 : volumes de sédimentation (mm) obtenus après réduction des échantillons par le moulin KT.

III.4 Essai au mixographe

Le mixographe permet de tester la résistance et l'extension des pâtes au cours du pétrissage (GODON et LOISEL, 1997).

Les résultats des mixogrammes présentés dans le tableau 16 et illustrés par les figures en (annexe 7) montrent que les paramètres : temps de développement (TD1), hauteur de développement (HD) et affaiblissement (AFF1) sont plus élevés dans les semoules par rapport aux farines.

En effet, les farines de blé dur présentent des temps de développement (TD1) compris entre 1,3 et 4,5 (mn) avec une moyenne de $2,71 \pm 1,32$, des hauteurs de développement (HD) qui varient de 33,3 à 50,2% avec une moyenne de $43,68 \pm 5,16\%$ et des degrés d'affaiblissement (Aff1) allant de 1 à 3,5 % avec une moyenne de $1,83 \pm 0,82\%$.

Les paramètres du mixographe sont plus élevés dans le cas des farines de la (3SF), suivie des farines centrales (FCG) puis les farines périphériques (FPG) avec des valeurs maximales pour «ERAD» et «LA BELLE» (tableau 16).

Quant aux semoules, elles présentent des temps de développements compris entre 2,5 et 4,2 (mn) avec une moyenne de $3,2 \pm 0,8$ (mn), des hauteurs de développement variant de 41,2 à 50,8% avec une moyenne de $46 \pm 4,66\%$ et des degrés d'affaiblissement allant de 1,75 à 3,1% avec une moyenne de $2,41 \pm 0,57\%$.

D'après KOVACS et *al.* (1997) la hauteur du pic obtenu au mixogramme est le meilleur critère de prédiction de la masticabilité et la fermeté des pâtes de blé durs. Quant à UTHAYAKUMARAN et *al.* (2004), ils ont montré que la force de la pâte est estimée par un temps de pétrissage au mixographe plus long .

L'utilisation des « gradings » de (WILLIAMS et *al.*, 1988) (annexe 5/1) relatif à l'appréciation de la force de la pâte, permet de classer les échantillons étudiés comme suit :

- Les fractions : 3SE de « LA BELLE », FCG et 3SF de « MIS 1 », FCG et 3SE de « ERIAD » ont des temps de pétrissage compris entre 3,4 et 4,3 min et des affaiblissements entre 1,5 et 2,6%, ce sont des farines/semoules de bonne force.

- Les fractions : 3SE de « MIS1 » et « MIS2 » ainsi que la 3SF de « ERIAD » ont des temps de pétrissage compris entre 2,5 et 3,2 min et des affaiblissements entre 2,2 et 3,5%, ce sont des farines/semoules de force moyenne.
- Les farines : FCG de « MIS2 » et la FPG de « ERIAD » ont des temps de pétrissage compris entre 1,7 et 1,9 min et des affaiblissements entre 1,3 et 3%, ce sont des farines/semoules de force faible.
- Les farines : FPG de « MIS1 » et FPG et 3SF de « MIS2 » ont des temps de pétrissage compris entre 1,3 et 1,4 min et des affaiblissements entre 1,0 et 1,3%, ce sont des farines/semoules de force très faible.
- Seule la 3SF de « LA BELLE » présente une très bonne force avec un temps de développement de 4,5 min et une tolérance au pétrissage de 1,8 %.

D'après ces résultats, les farines « 3SF » et les semoules possèdent les meilleures forces.

Par ailleurs, les farines provenant de la périphérie du grain sont plus faibles que celles du centre malgré leur richesse en protéines. Ceci pourrait être expliqué par la différence qualitative de la composition protéique formant le réseau glutineux et qui dépend de l'origine histologique du grain de blé dur.

III.5 Essai à l'alvéographe Chopin

Le test à l'alvéographe Chopin illustré par les figures (annexe 8) et résumé dans le tableau 16 permet de prédire la qualité boulangère d'une farine. Il présente un intérêt pratique très apprécié par les professionnels de la seconde transformation, du fait qu'il rend compte par le biais des différents paramètres alvéographiques mesurés, de l'aptitude d'une farine à être travaillée en fonction de sa force boulangère pour une finalité précise (BERLAND et ROUSSEL, 2005).

Force boulangère (W) : Le paramètre « W » permet de déterminer la force boulangère d'une farine, il est très utilisé dans les transactions commerciales.

Les farines de blé dur présentent des forces variables d'un échantillon à un autre, les valeurs sont comprises entre 67,23 (FPG : MIS 1) et 229,35 (10^{-4} J) pour la 3SF de « LA BELLE », avec une moyenne de $129,14 \pm 42,27$ (10^{-4} J). Les farines de la (3SF) présentent les forces les plus élevées avec une moyenne $152,44 \pm 54,86$ sec, suivies de celles des farines centrales (FCG) puis les farines périphériques (FPG) avec des moyennes de $121,46 \pm 11,49$ et $105,77 \pm 37,45$ (10^{-4} J) respectivement. Les forces des farines de « MIS1 » et « MIS 2 » sont les plus faibles.

Celle des semoules est plus élevée ; elle varie de 96,13 (3SF : MIS1) à 245,83 (10^{-4} J) pour la 3SE de « ERIAD », avec une moyenne de $156,12 \pm 63,66$ (10^{-4} J). Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées par (FOIS et *al.*, 2011) ($97-187$ 10^{-4} J).

D'après FEILLET (2000), la variabilité de la force boulangère peut s'expliquer par la teneur en gliadine et en gluténine et également par la disponibilité de certains acides aminés (cystéines) qui fournissent des ponts disulfures intramoléculaires par lesquelles s'associent les gliadines.

Selon BERLAND et ROUSSEL (2003), la force boulangère est influencée par la granulométrie de la farine qui est en relation avec la texture (dureté de l'albumen) et en particulier les proportions élevées en amidon endommagé et en pentosanes.

CALVEL (1980) a noté que si ce paramètre a de l'importance, sa signification reste limitée si l'on ne tient pas compte des autres caractéristiques alvéographiques.

Gonflement (G) : Le gonflement « G » renseigne sur l'extensibilité de la pâte et permet d'apprécier l'aptitude du réseau de gluten à retenir le gaz carbonique (KITTISSO, 1995).

Les valeurs de gonflement des farines varient peu, elles sont comprises entre 11,4 (FPG : MIS 1) et 14,15 (cm^3) (FCG : MIS 1), avec une moyenne de $12,6 \pm 1,01$ (cm^3). Celles des semoules varient de 12,64 (3SE : LA BELLE) à 16,02 (cm^3) (3SE: MIS1), avec une moyenne de $14,18 \pm 1,75$ (cm^3).

Ces valeurs sont plus faibles que celles préconisées en boulangerie par la norme (I.S.O. 5530/04) et qui se situent entre 20 et 23. Ces fractions de mouture se caractérisent par un faible gonflement.

Ténacité (P) : La ténacité « P » est un indicateur de la résistance de la pâte à la déformation.

Les valeurs de « P » pour les farines de blé dur varient d'un échantillon à un autre, elles sont plus élevées dans le cas des farines de la (3SF) suivie de celles des farines centrales (FCG) et périphériques (FPG) avec des moyennes de $111,07 \pm 30,52$ (mm), $97,47 \pm 11,64$ (mm) et $91,00 \pm 20,92$ (mm) respectivement. Les unités « ERIAD » et « LA BELLE » possèdent les farines les plus tenaces.

Les valeurs de « P » des semoules sont supérieures à celles des farines avec des valeurs comprises entre 75,9 et 142,65 (mm) et une moyenne de $114,2 \pm 32,12$ (mm). Elles sont supérieures à celles trouvées par (FOIS et *al.*, 2011) (52-116 mm).

La plupart des échantillons présentent des ténacités élevées, supérieures à la limite de 80 mm fixée par BERLAND et ROUSSEL (2003), exceptions faites pour FPG et 3SE de « MIS1 »

En effet, les travaux de AMMAR et *al.* (2000) effectués sur les produits de blé dur, montrent que la faible qualité de gluten engendre des pâtes très tenaces et moins extensibles. D'après KITTISSO (1995), Les valeurs de « P max » dépendent d'une part, de la consistance ou de la viscosité et d'autre part de la résistance élastique des pâtes, qui, elle-même est liée à la qualité et à la quantité des protéines ainsi qu'à la capacité d'hydratation des différents constituants.

Extensibilité (L) : les valeurs de « L » varient de 26 (FPG : MIS1) à 40 (mm) (FCG : MIS1), avec une moyenne de $32,11 \pm 41,37$ (mm) pour les farines. Elles sont plus élevées dans les semoules et varient de 33 (MIS2, LA BELLE) à 52 (mm) (MIS1), avec une moyenne de $41,37 \pm 9,48$ (mm). Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées par FOIS et *al.* (2011) (38-72 mm).

Selon RAO et *al.* (2010), l'extensibilité « L » dépend de la teneur en protéines, par contre la ténacité « P » est affectée généralement par les procédés de mouture. D'autre part, les facteurs génétiques et environnementaux sont des facteurs qu'on ne peut exclure.

Rapport de configuration P/L : Ce rapport traduit l'équilibre générale de l'alvéogramme, c'est -à -dire l'équilibre entre la ténacité et l'extensibilité des pâtes formées.

Les farines de blé dur ont des rapports de configuration P/L variant de 2,13 à 4,4, avec une moyenne de $3,16 \pm 0,74$. Quant aux semoules, ces rapports sont compris entre 1,45 et 4,32, avec une moyenne de $3,39 \pm 0,79$. Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées par FOIS et *al.* (2011) qui varient de 0,9-2,83, mais sont en accord avec QUAGLIA (1988) qui indique que l'alvéogramme typique du blé dur possède une forte ténacité P au détriment de l'extensibilité L, et par conséquent un rapport P/L > 1,5.

En panification du blé dur, le ratio P/L ne doit pas dépasser 2, avec un optimum qui se situe entre 0,4 et 0,8 (BOYACIOGLU et D'APPOLONIA 1994a ; BOGGINI et *al.*, 1997).

De ce fait, les fractions étudiées présentent des rapports P/L déséquilibrés qui se caractérisent par des pâtes tenaces et inextensibles.

Les paramètres alvéographiques sont influencés par le taux d'amidon endommagé durant la mouture et la capacité d'absorption de la farine/semoule de blé dur (EDWARDS et DEXTER, 1987). L'augmentation de l'amidon endommagé ou la diminution de la teneur en eau de la pâte provoquent l'augmentation des valeurs de P, P/L et W et une diminution des valeurs de L et G (PRESTON et *al.*, 1987).

Par ailleurs, DEXTER et *al.* (1994), montrent que la dureté, la granulométrie des particules, la teneur en pentosanes et l'amidon endommagé influent considérablement sur la ténacité et l'extensibilité des pâtes.

Plus le rapport P/L est élevé (courbe plus haute que longue), plus la farine/semoule sera tenace et forte. Par contre, si ce rapport est plus faible (courbe plus longue que haute), la farine/semoule sera extensible. Le W quant à lui, peut être identique dans ces deux cas, ce qui laisse dire que ce paramètre à lui seul ne permet pas de préjuger le comportement futur d'une farine (NAEGA 2005).

Indice d'élasticité (Ie) : L'indice d'élasticité est défini par le rapport de pression P200/P max de l'alveogramme, il est étroitement corrélé à l'élasticité des pâtes (KITISSOU, 1995).

Les indices d'élasticité sont variables, avec une moyenne de $8,93 \pm 14,39$ pour les farines et $0,11 \pm 0,2$ pour les semoules. Selon BERLAND et ROUSSEL (2005), un bon indice d'élasticité se situe entre 45 et 55, entre 35-45 il est moyen et inférieur à 35, il est insuffisant.

La plupart des échantillons présentent des indices d'élasticité faibles à nul à l'exception de la 3SE de « ERIAD » où l'indice d'élasticité est moyen.

D'après DACOSTA (1986), SHEWRY et *al.* (2002), les farines qui contiennent le plus de gluténines de haut poids moléculaires, donnent des pâtes plus élastiques.

Les valeurs moyennes caractéristiques des paramètres alvéographiques pour la panification sont mentionnées en (annexe 5/2 et 5/4). Sur la base de la norme (I.S.O. 5530/04), et le J.O.R.A (1991) les fractions étudiées peuvent être classées comme suit :

- La FPG, 3SF de « ERIAD », 3SE de « MIS2 » et la 3SE de « LABELLE » ont des forces W variables entre 135 et 154 (10^{-4} J) comprises entre l'intervalle 130-180 (10^{-4} J) préconisé en panification mais avec des gonflements faibles (moins de 20) et possèdent des rapports de configuration P/L déséquilibrés et élevés entre (2,95 et 4,32).

- La 3SF de « LABELLE » et la SE de « ERIAD » ont une force élevée (229,35 et 245,83.10⁴J respectivement) et des rapports de configuration P/L déséquilibrés et élevés (4,4 et 2,92 respectivement).
- Le reste des échantillons possède une faible force boulangère (inférieure à 130.10⁴J).

D'une façon générale, les fractions étudiés se caractérisent par des gonflements G faibles (inférieur à 20), des ténacités élevés, des rapports de configuration P/L déséquilibrés et élevés et des indices d'élasticité dans la plupart des cas nuls, ils sont donc impanifiables en l'état et nécessitent une correction.

La force et la ténacité sont plus élevées dans le cas des semoules, suivies des farines de la (3SF) et diminuent avec l'avancement de la mouture. Elles sont plus marquées dans le cas des fractions des unités de « LA BELLE » et « ERIAD ».

III.6 Essai au farinographe BRABENDER

Le farinographe permet de mesurer l'absorption d'eau d'une farine ainsi que le temps de développement de la pâte, en déterminant la quantité d'eau au pétrissage.

Les résultats du farinographe sont regroupés dans le tableau 16 et sont illustrés sur les figures représentées en annexe 9.

Les farines de blé dur ont des taux d'absorption d'eau (H%) variant de 55,9 à 62,4% avec une moyenne de 59,8±2,67%, des temps de développement (TD2) compris entre 2 et 5 (mn) avec une moyenne de 2,91±1,2 (mn), des temps de stabilité qui fluctuent entre 3,2 et 6,9 (mn) avec une moyenne de 4,35±1,33, et des degrés d'affaiblissement (Aff2) compris entre 75 et 114 (UF) avec une moyenne de 99,16±14,95 (UF).

Concernant les semoules, les taux d'absorption d'eau (H%) varient de 55,1 à 58,1% avec une moyenne de 56,96±1,62%, des temps de développement (TD2) compris entre 2,5 et 3,7 (mn) avec une moyenne de 3,2±0,62 (mn), des temps de stabilité qui fluctuent entre 2,7 et 6,3 (mn) avec une moyenne de 4,8±1,87, et des degrés d'affaiblissement (Aff2) compris entre 71 et 133 (UF) avec une moyenne de 95±33,28 (UF).

L'absorption d'eau des farines est supérieure à celle des semoules et semble augmenter dans les farines périphériques (qui sont plus riches en protéines, en amidon endommagé et en

pentosanes (BOYACIOGLU et D'APPOLONIA, 1994a). La taille des particules des semoules est aussi un facteur important dans l'absorption de l'eau (DEXTER et MATUSO, 1978).

Les farines de la 3SF ont des Temps de développement et de stabilité plus longs suivies de ceux des semoules, des farines centrales et périphériques respectivement.

Le temps de développement de la pâte est un indicateur de la qualité des protéines. Les farines ayant une bonne force ont généralement un temps de développement et une stabilité plus longs.

Les paramètres mesurés par le farinographe peuvent être corrélés avec le comportement de la pâte au pétrissage en boulangerie. Cette étape étant très importante dans le processus de panification, elle apporte des informations intéressantes dans le jugement de la qualité des farines.

D'après l'analyse des paramètres farinographiques (annexe 5/3) effectuée par (BERLAND et ROUSSEL, 2005) en vue l'une utilisation en panification française, les fractions étudiées peuvent être classées selon leur stabilité comme suit :

- Les fractions FCG et 3SE de « MIS1 », FCG et FPG de ERIAD ont une stabilité moyenne (entre 2,7 et 3,8) avec des affaiblissements élevés (supérieurs à 100 UB);
- Les fractions FPG de « MIS1 », 3SF et 3SE de « ERIAD », 3SF et 3SE de « LABELLE » ont une bonne stabilité (entre 4,3 et 6,9 min) et des affaiblissements se situant entre 50 et 100 sauf pour la fraction FPG de « MIS1 » qui dépasse 100 UB.

D'une manière générale, le farinographe montre que les semoules présentent un pouvoir d'absorption inférieure à celui des farines et que les fractions « 3SF » et « 3SE » possèdent les temps de développement les plus longs avec de bonnes stabilité et résistance au pétrissage.

Tableau 16 : résultats des analyses rhéologiques sur les produits de mouture de blé dur.

| Unités | Fractions | Alvéographe | | | | | | Mixographe | | | Farinographe | | | |
|------------------|------------|------------------------|----------------------|--------|--------|------|--------|------------|--------|----------|--------------|----------|-----------|-----------|
| | | W (10 ⁻⁴ J) | G (cm ³) | P (mm) | L (mm) | P/L | Ie (%) | TD1 (mm) | HD (%) | Aff1 (%) | H (%) | TD2 (mm) | Stab (mn) | Aff2 (UF) |
| FCG | MIS 1 | 129,82 | 14,15 | 86,07 | 40 | 2,15 | 30,37 | 4,10 | 39,5 | 1,5 | 55,9 | 2 | 3,2 | 101 |
| | MIS 2 | 108,36 | 11,4 | 97 | 27 | 3,60 | 0 | 1,70 | 46,9 | 1,3 | - | - | - | - |
| | ERIAD | 126,22 | 11,7 | 109,34 | 28 | 3,90 | 0 | 1,90 | 43,8 | 3,0 | 60,4 | 3 | 3,8 | 106 |
| | Moyenne | 121,46 | 12,41 | 97,47 | 31,66 | 3,21 | 10,12 | 2,56 | 43,4 | 1,93 | 58,15 | 2,5 | 3,5 | 103,5 |
| | Ecart-type | 11,49 | 1,50 | 11,64 | 7,23 | 0,93 | 17,53 | 1,33 | 3,71 | 0,92 | 3,18 | 0,70 | 0,42 | 3,53 |
| FPG | MIS 1 | 67,23 | 11,40 | 67,1 | 26 | 2,58 | 0 | 1,40 | 33,3 | 1,30 | 57,1 | 1,5 | 4,4 | 114 |
| | MIS 2 | 108,04 | 11,74 | 99,88 | 28 | 3,56 | 0 | 1,30 | 48,2 | 1,0 | - | - | - | - |
| | ERIAD | 142,04 | 13,22 | 106,03 | 35 | 3,02 | 0 | 3,40 | 45,6 | 2,1 | 62,4 | 3 | 3,5 | 111 |
| | Moyenne | 105,77 | 12,12 | 91,00 | 29,66 | 3,05 | 0 | 2,03 | 42,3 | 1,46 | 59,75 | 2,25 | 3,95 | 112,5 |
| | Ecart-type | 37,45 | 0,96 | 20,92 | 4,72 | 0,49 | 0 | 1,18 | 7,95 | 0,56 | 3,74 | 1,06 | 0,63 | 2,12 |
| 3SF | MIS 1 | 115,36 | 13,9 | 83,16 | 39 | 2,13 | 29,5 | 4,30 | 39,4 | 1,75 | - | - | - | - |
| | MIS 2 | 110,78 | 12,57 | 92,95 | 32 | 2,90 | 0 | 1,30 | 50,2 | 1,1 | - | - | - | - |
| | ERIAD | 154,27 | 12,96 | 116,38 | 34 | 3,42 | 29,5 | 3,20 | 47,8 | 3,5 | 62 | 3 | 4,3 | 88 |
| | LA BELLE | 229,35 | 13,05 | 151,8 | 34,5 | 4,4 | 0 | 4,50 | 42,1 | 1,8 | 61 | 5 | 6,9 | 75 |
| | Moyenne | 152,44 | 13,12 | 111,07 | 35 | 3,21 | 14,75 | 3,32 | 44,87 | 2,03 | 61,5 | 4 | 5,6 | 81,5 |
| | Ecart-type | 54,86 | 0,56 | 30,52 | 3,60 | 0,95 | 17,03 | 1,46 | 4,98 | 1,02 | 0,70 | 1,41 | 1,838 | 9,19 |
| Moyenne/ farines | | 129,14 | 12,60 | 100,97 | 32,11 | 3,16 | 8,93 | 2,71 | 43,6 | 1,83 | 59,8 | 2,91 | 4,35 | 99,16 |
| Ecart-type | | 42,27 | 1,01 | 22,88 | 5,23 | 0,74 | 14,39 | 1,32 | 5,16 | 0,82 | 2,67 | 1,20 | 1,33 | 14,95 |
| 3SE | MIS 1 | 96,13 | 16,02 | 75,9 | 52 | 1,45 | 32,8 | 2,60 | 42,9 | 3,1 | 55,1 | 2,5 | 2,7 | 133 |
| | MIS 2 | 135,21 | 12,74 | 99,66 | 33 | 2,95 | 0 | 2,50 | 50,8 | 2,2 | - | - | - | - |
| | ERIAD | 245,83 | 15,35 | 138,87 | 47,5 | 2,92 | 43,6 | 3,50 | 49,1 | 1,75 | 57,7 | 3,4 | 6,3 | 71 |
| | LA BELLE | 147,34 | 12,64 | 142,65 | 33 | 4,32 | 0 | 4,20 | 41,2 | 2,6 | 58,1 | 3,7 | 5,4 | 81 |
| | Moyenne | 156,12 | 14,18 | 114,27 | 41,37 | 3,39 | 19,1 | 3,2 | 46 | 2,41 | 56,96 | 3,2 | 4,8 | 95 |
| | Ecart-type | 63,66 | 1,75 | 32,12 | 9,84 | 0,79 | 22,4 | 0,80 | 4,66 | 0,57 | 1,62 | 0,62 | 1,87 | 33,28 |

IV. RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS TESTS D'APPRECIATION DE LA QUALITE EFFECTUES (COEFFICIENT DE CORRELATION DE PEARSON « R »)

IV.1 Relations entre les résultats des différents tests technologiques

Le tableau 17 rassemble les coefficients de corrélation obtenus entre les différents tests d'appréciation de la qualité technologique.

IV.1.1 Les paramètres de l'alvéographe

Le W alvéographique est corrélé positivement et de manière hautement significative à la ténacité P de la pâte, ($r=0,864$). Ceci est en accord avec les résultats trouvés par (AMMAR et al., 2000) ($r=0,84$, $P<0,01$) sur le blé dur.

Aucune corrélation n'a été trouvée entre le W et le rapport de configuration P/L, l'extensibilité L, et l'indice d'élasticité. Aussi, UTHAYKUMARAN et al. (2004) n'ont pas observé de corrélation entre le W et le rapport P/L contrairement à (AMMAR et al., 2000) qui ont trouvé des corrélations positives hautement significatives entre le W et le rapport P/L ($r=0,53$), mais pas de corrélation avec l'extensibilité L.

Le gonflement G est corrélé positivement et de manière significative à l'extensibilité L et l'indice d'élasticité I_e ($r=0,630$, $r=0,767$) respectivement et négativement et significativement corrélé au rapport de configuration P/L ($r= -0,598$), mais non corrélé à la force W. Ces résultats rejoignent ceux de (CUBADDA et al., 1992) ($r=0,45$, $P< 0,01$) observés sur la semoule de blé dur.

La ténacité P est corrélée positivement et de façon hautement significative avec le rapport de configuration P/L ($r=0,761$). Aucune corrélation n'a été observée entre la ténacité P et l'extensibilité L contrairement à (RAO et al., 2010) qui ont trouvé une corrélation négative ($r= -0,63$, $p<0,05$).

AMMAR et al. (2000), EDWARDS et al. (2001) et RAO et al. (2001) suggèrent que la force du gluten et son extensibilité sont des paramètres importants dans la détermination de la qualité boulangère du blé dur. RAO et al. (2010) ont trouvé des corrélations positives entre l'extensibilité et le volume du pain ($r=0,71$, $p<0,01$) et confirment que plus l'extensibilité

augmente, meilleur est le volume du pain de blé dur. Mais avec un gluten faible, une forte extensibilité n'est pas recherchée pour augmenter le volume du pain.

Le rapport de configuration P/L présente une corrélation négative significative à la granulométrie ($r = -0,580$) et hautement significative à l'extensibilité ($r = -0,715$), cette dernière est en accord avec les résultats de (AMMAR *et al.*, 2000) et (RAO *et al.*, 2010) qui ont trouvé un coefficient de corrélation de ($r = -0,86, P \leq 0,05$ et $r = -0,87, P < 0,01$) respectivement.

III.1.2 Les paramètres du mixographe

Pour ce test peu de corrélations ont été observées.

Le temps de développement des pâtes TD1 présente une corrélation positive et significative avec le W alvéographique ($r = 0,598$).

PENA (2000) a trouvé des corrélations semblables entre le temps de développement de la pâte et le W ($r = 0,54, P < 0,01$) et des corrélations positives et significatives avec le rapport P/L ($r = 0,15$). Il a trouvé aussi des corrélations positives hautement significatives entre la hauteur de développement et le W alvéographique ($r = 0,44$) et des corrélations négatives et hautement significatives entre la hauteur de développement et le rapport P/L ($r = -0,38$).

IV.1.3 Les paramètres du farinographe

Le temps de développement de la pâte TD2 est corrélé positivement et de manière hautement significative à la ténacité P ($r = 0,917$) et de manière significative à la force de la pâte W, le rapport de configuration P/L et la stabilité, ($r = 0,792, r = 0,742, r = 0,738$) respectivement. Des corrélations négatives et significatives sont observées avec l'affaiblissement de la pâte mesuré au farinographe AFF2 ($r = -0,683$).

La stabilité est corrélée positivement aux paramètres de force de l'alvéographe. Ces corrélations sont positives hautement significatives à la ténacité P ($r = 0,818$) et significatives à la force W et rapport de configuration P/L ($r = 0,789, r = 0,673$). La stabilité de la pâte est corrélée négativement et de manière hautement significative à l'affaiblissement AFF2 ($r = -0,872$).

L'affaiblissement Aff2 est corrélé négativement avec les paramètres de force de la pâte : le W ($r = -0,848, P < 0,05$), la ténacité P ($r = -0,882, P < 0,01$) et le rapport de configuration P/L ($r = -0,692, P < 0,05$).

BOGGINI *et al.* (1988) ont trouvé des corrélations positives et hautement significatives entre le volume du pain, le temps de développement et la stabilité au farinographe ($r=0,32$, $r=0,70$) et des corrélations négatives hautement significatives avec la résistance de la pâte ($r= -0,56$).

CHUNG *et al.* (2001) et NEACSU *et al.* (2009) ont trouvé des corrélations positives et significatives ($P<0,1$, $P<0,001$) entre l'absorption d'eau et les paramètres de l'alvéographe (L et la force W) du blé dur.

SAPIRSTEIN *et al.* (2007) ont montré que les propriétés technologiques suivantes ; W alvéographique, temps de développement au mixographe et au farinographe sont très reliées à la force du gluten.

RAO *et al.* (2010) ont trouvé que le taux d'absorption d'eau des farines de blé tendre mesuré au farinographe était supérieur à ceux des farines/semoules de blé dur et est corrélé négativement avec l'extensibilité ($r=-0,65$, $P<0,01$).

IV.1.4 Caractéristiques du gluten

Les résultats portant sur le **gluten** (gluten sec GSc, gluten humide GH) révèlent des corrélations positives et hautement significatives entre elles ($r=0,958$). Ceci a été observé par (PASQUALONE *et al.*, 2004 ; OKANDZA, 2000 ; PENA, 2000 et AIT SIDHOUM et BENDJABEUR, 2009) qui ont trouvés respectivement des coefficient de corrélation ($r= 0,92$, $P<0,001$, $r=0,88$, $P<0,05$, $r=0,99$, $P<0,0001$, $r=0,95$, $P<0,01$). PENA (2000) estime que la forte corrélation entre GSc et GH indique que la capacité d'hydratation mesure la quantité plutôt que la qualité du gluten.

Les GSc et GH ne sont pas corrélés au gluten index GIx, ce qui correspond aux résultats de (OKANDZA, 2000).

CUBADDA *et al.* (1992), ont trouvé des corrélations négatives entre le GIx et le GSc ($r= -0,25$, $P<0,01$). De même que (TIGROUDJA et BENDJOUADIUADDA, 1999) qui ont trouvé des corrélations négatives entre le gluten GI et GSc mais aussi avec le GH ($r= -0,71$, $P<0,01$, $r= -0,64$, $P<0,01$) et (PENA, 2000) ($r= -0,45$, $P<0,01$, $r=-0,41$, $P<0,01$).

Par ailleurs, les mesures : gluten sec GSc, gluten humide GH et gluten index GIx sont corrélées positivement à des degrés de significations diverses aux paramètres de force de la pâte. Le GSc et GH sont positivement corrélés et de manière hautement significative à la force W et à la ténacité P avec des coefficients de corrélation de ($r=0,763$, $r=0,849$) respectivement pour le gluten sec et ($r=0,819$, $r=0,837$) pour le gluten humide. Aussi, le GSc est positivement et significativement corrélé au rapport de configuration P/L ($r=0,543$). OKANDZA (2000) a trouvé des corrélations positives entre le gluten humide et la hauteur de développement ($r=0,57$, $P<0,05$).

La stabilité et l'affaiblissement au farinographe sont reliés aux propriétés du gluten des farines/semoules de blé dur. (RAO et *al.*, 2010). En effet, le gluten sec (GSc) est corrélé positivement et significativement à la stabilité ($r=0,752$), et le gluten humide est corrélé positivement et de manière hautement significative au temps de développement TD2 ($r=0,849$). Ces deux paramètres (GSc et GH) sont négativement et significativement corrélé à l'affaiblissement Aff2 ($r= -0,789$, $r= -0,680$).

PENA (2000) a aussi trouvé des corrélations positives et significatives entre la GSc et GH avec la force de la pâte W ($r= 0,15$, $r=0,17$), mais au contraire des corrélations négatives et hautement significatives avec le rapport de configuration P/L ($r= -0,31$, $r= -0,32$), de même, (PASQUALONE et *al.*, 2004) ont trouvé des corrélations négatives significatives entre le GSc et le rapport de configuration P/L ($r= -0,58$).

Quant au gluten index GIx, il est aussi corrélé positivement aux paramètres de force de la pâte : W, la ténacité P, le temps de développement de la pâte TD1 et aussi à l'indice d'élasticité (Ie) mais à un degré moindre avec des coefficient de corrélation ($r=0,571$, $r=0,549$, $r= 0,572$, $r= 0,601$, $P<0,05$). Ces résultats rejoignent ceux de (CUBADDA et *al.*, 1992) et (PENA, 2000) pour ce qui concerne les corrélations positives entre le gluten index et la force de la pâte W avec des coefficients de ($r=0,8$, $r= 0,51$ avec $P<0,01$) respectivement et avec le rapport P/L ($r=0,19$, $P<0,05$) (PENA, 2000).

LERNER et *al.* (2004) ont trouvé des corrélations négatives entre le gluten index GIx et la tolérance au pétrissage mesurée au farinographe ($r= -0,93$, $P<0,05$).

L'extractibilité du gluten est corrélée positivement et significativement avec le gluten humide, le gluten index et le temps de développement de la pâte TD2 ($r=0,536$, $r=0,595$, $r=0,698$).

IV.1.5 Les volumes de sédimentation (SDS1 et SDS2)

Ces volumes sont fortement corrélés entre eux ($r=0,976$, $P<0,01$) mais ne sont pas corrélés aux paramètres rhéologiques effectués par l'alvéographe, le mixographe et le farinographe. Il existe néanmoins, des corrélations négatives et significatives entre les tests SDS1 et SDS2 et la granulométrie des fractions ($r=-0,589$, $r=-0,557$) et entre le test SDS2 et le gluten index ($r=-0,533$). WANG et KOVACS (2002c) ont au contraire trouvé que le test de sédimentation permet de prédire la qualité du gluten et ont trouvé des corrélations positives avec la force de la pâte W, le gluten index, le temps de développement et le SIG (swelling index of gluténines).

IV.1.6 L'indice de chute IC

L'indice de chute est corrélé positivement de manière hautement significative à la ténacité de la pâte P et au rapport P/L ($r=0,810$, $r=0,819$), au gluten sec et humide ($r=0,745$, $r=0,764$), et de façon significative avec l'absorption d'eau, et le temps de développement mesurés au farinographe ($r=0,733$, $r=0,731$).

Tableau 17: Corrélations entre les paramètres technologiques (coefficient de PEARSON « r »).

| | G | P | L | W | P/L | Ie | TD1 | H% abs | TD2 | STAB | AFF2 | SDS1 | SDS2 | IC | GH | GSc | GIx |
|-------------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|-----------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| PT | | ,570* | | | | | | ,674* | | | | | | | ,699** | ,789** | |
| L | ,630* | | | | | | | | | | | | | | | | |
| W | | ,864** | | | | | | | | | | | | | | | |
| P/L | -,598* | ,761** | -,715** | | | -,643* | | | | | | | | | | | |
| Ie | ,767* | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TD1 | | | | ,598* | | | | | | | | | | | | | |
| TD2 | | ,917** | | ,792* | ,742* | | | | | | | | | ,731* | | | |
| STAB | | ,818** | | ,789** | ,673* | | | | ,738** | | | | | | | | |
| AFF2 | | -,882** | | -,848** | -,692* | | | | | -,872** | | | | | | | |
| SDS2 | | | | | | | | | | | | ,976** | | | | | |
| IC | | ,810** | | | ,819** | | | ,733* | ,731* | | | | | | | | |
| GH | | ,837** | | ,781** | | | | | ,849** | | -,680* | | | ,764** | | | |
| GSc | | ,849** | | ,763** | ,543* | | | | | ,752* | -,789* | | | ,745** | ,958** | | |
| GIx | | ,549* | | ,571* | | ,601* | ,572* | | | | | | -,533* | | | | |
| EXTR | | | | | | | | | ,698* | | | | | | | ,536* | ,595* |
| D50 | | | | | -,580* | | | | | | | -,589* | -,557* | | | | |

** . La corrélation est significative au niveau 0.01.

* . La corrélation est significative au niveau 0.05.

V.2 Relations entre les protéines totales et les paramètres technologiques

Les résultats présentés sur le tableau 17 montrent des corrélations positives et significatives entre les protéines totales, la ténacité P de la pâte ($r=0,570$) et l'absorption d'eau au farinographe ($r=0,674$). GUTIERREZ *et al.* (1999) affirment que les facteurs de composition de la farine influent considérablement sur l'hydratation : l'amidon endommagé et les protéines fixent environ deux fois leur masse, ce qui explique la corrélation positive entre la teneur en protéines et l'absorption d'eau des farines et semoules.

D'autre part, KUNERTH et D'APPOLONIA (1985) affirment que la qualité et la quantité des protéines influent considérablement le taux d'hydratation.

Les protéines totales présentent aussi des corrélations positives hautement significatives avec le gluten humide GH et le gluten sec GSc ($r=0,699$ - $r=0,789$). Ceci a été observé par plusieurs auteurs : (PASQUALONE *et al.*, 2004 et CUBADDA *et al.*, 1992) qui ont trouvé des corrélations positives et hautement significatives entre les protéines et le gluten sec GSc ($r= 0,72$, $r =0,82$) respectivement. CUBADDA *et al.* (1992) ont trouvé des corrélations positives hautement significatives avec la force W et le gonflement de la pâte avec des coefficients ($r= 0,42$ - $r= 0,42$) respectivement.

Il n'existe aucune corrélation entre les protéines totales et le gluten index GIx, ce qui est en accord avec (TIGROUDJA et BENDJOUADIOUADDA, 1999) et (AIT SIDHOUM et BENDJABEUR, 2009). CLARKE *et al.* (2004) mentionnent des corrélations faibles à nul entre les protéines et le gluten index des semoules. Quant à AUTRAN *et al.* (1986) et OKANDZA (2000), ils ont trouvé que les caractères du gluten sont indépendants de la teneur en protéines. Ce dernier a trouvé par contre des corrélations positives et hautement significatives avec la hauteur de développement au mixographe ($r=0,81$).

Aucune corrélation n'existe entre les protéines totales et le test SDS, ni avec les paramètres du mixographe ce qui rejoint les résultats de (RACITI *et al.*, 2003).

IV.3 Relations entre les protéines totales et les fractions protéiques

Le tableau 18 donne les corrélations entre les protéines totales et les fractions protéiques.

Les résultats obtenus ne révèlent pas de corrélations entre les protéines totales et les résultats des fractions protéiques exprimés en % des protéines totales à l'exception du résidu insoluble final ($r= 0,567$ avec $P<0,05$).

Inversement, des corrélations positives sont observées entre les protéines totales et les fractions protéiques exprimées en matière sèche. En effet, des corrélations positives et hautement significatives sont observées pour les protéines monomériques, gluténines solubles, GS-HPM des gluténines insolubles, gluténines insolubles, le résidu protéique insoluble, les protéines polymériques et les gluténines totales avec des coefficients ($r=0,761, r=0,723, r= 0,862, r=0,714, r=0,858, r=0,921, r=0,784$) respectivement, et des corrélations positives significatives avec les SG-FPM des gluténines insolubles, ($r=0,634$).

Tableau 18 : Corrélations entre les protéines totales et les fractions protéiques.

| Fractions protéiques | Pr Tot |
|----------------------|---------------|
| PM%PT | -0,051 |
| PM%MS | ,761** |
| GS%PT | -0,183 |
| GS%MS | ,723** |
| SG-HPM Ins %PT | ,549 |
| SG-HPM Ins % MS | ,862** |
| SG-FPM ins %PT | 0,211 |
| SG-FPM Ins% MS | ,634* |
| GI%PT | 0,282 |
| GI% MS | ,714** |
| RI%PT | ,567* |
| RI% MS | ,858** |
| GT%PT | 0,182 |
| GT% MS | ,784** |
| PRO. POL%PT | 0,485 |
| PRO. POL% MS | ,921** |
| PM/PRO POL | -0,247 |
| SG-FPM/SG-HPM Ins | -0,130 |

** . La corrélation est significative au niveau 0.01

* . La corrélation est significative au niveau 0.05.

IV.4 Relations entre les fractions protéiques et les différents paramètres technologiques de la pâte

Le tableau 19 regroupe les résultats des coefficients de corrélations obtenues entre les paramètres technologiques et les différentes fractions protéiques ainsi que leurs ratios. Il en ressort que :

-Les teneurs en **protéines monomériques** par rapport aux protéines totales sont corrélées négativement et significativement à quelques paramètres de force : W alvéographique et la ténacité P et aussi au gluten humide (GH) avec des coefficients ($r = -0,635$, $r = -0,645$, $r = -0,536$) respectivement et négativement et de manière hautement significative au gluten index GIx ($r = -0,708$). Ces protéines sont corrélées positivement et de manière hautement significativement avec les tests SDS1 et SDS2 ($r = 0,689$, $r = 0,760$).

WANG et KOVACS (2002c) ont trouvé des corrélations négatives entre les protéines monomériques (exprimées en % de protéines totales et par rapport à la farine) et la force W, le temps de développement de la pâte au mixographe, la résistance maximale et le gluten index, mais des corrélations positives avec le gonflement de la pâte.

-Les teneurs en **gluténines solubles** par rapport à la matière sèche sont corrélées positivement et significativement avec la ténacité P et le rapport P/L ($r = 0,598$, $r = 0,589$). Ceci correspond aux résultats de YOUYOU (2012) sur le blé tendre. Les gluténines solubles sont aussi corrélées positivement et de manière hautement significative à la stabilité ($r = 0,884$) et à un degré moindre au gluten sec ($r = 0,629$), mais négativement et de manière hautement significative à l'affaiblissement AFF2 ($r = -0,827$).

WANG et KOVACS (2002c) ont trouvé que les gluténines solubles sont associées à l'extensibilité (mesuré à l'extensigraphe) et non corrélées à la force du gluten.

DEXTER et MATUSO (1980) en utilisant une méthode modifiée d'Osborne, ont trouvé des corrélations négatives entre les gluténines solubles (extraites par l'acide acétique après extractions séquentielles avec du sel et une solution d'éthanol) et la force du gluten.

Les teneurs en **gluténines insolubles** par rapport aux protéines totales sont corrélées positivement et de manière hautement significative avec la ténacité de la pâte P, la force boulangère W et la teneur en gluten humide ($r = 0,739$, $r = 0,803$, $r = 0,706$), positivement et

significativement à la teneur en gluten sec, gluten index et au temps de développement de la pâte mesurée au farinographe TD2 ($r=0,625$, $r=0,586$, $r=0,752$) mais négativement corrélées et de manière hautement significative aux tests SDS1 et SDS2 ($r= -0,682$, $r= -0,723$).

-Les teneurs en gluténines insolubles en (%MS) sont corrélés positivement et de façon hautement significative avec la force boulangère W, la ténacité P, la teneur en gluten humide et en gluten sec ($r= 0,853$, $r=0,830$, $r=0,859$, $r=0,856$) et positivement et significativement au temps développement TD2 et la stabilité de la pâte mesurés au farinographe ($r=0,745$, $r=0,749$) mais négativement et significativement à l'affaiblissement ($r= -0,682$).

Ces résultats sont en accord avec ceux de (WANG et KOVACS, 2002c) qui ont trouvé des corrélations positives entre les gluténines insolubles (par rapport aux protéines totales et à la matière sèche avec la force boulangère et le gluten index, en plus de cela avec la résistance maximale et le temps de développement de la pâte et des corrélations négatives avec le gonflement.

Des corrélations négatives significatives sont observées entre les gluténine insolubles et l'affaiblissement au farinographe, et les deux tests SDS1 et SDS2 ($r= -0,571$, $r= -0,566$, $r=-0,577$).

Il a été démontré que les gluténines insolubles présentes dans la farine de blé tendre sont associées à la qualité boulangère (GUPTA et *al.*, 1993 ;PRESTON et *al.*, 1992 ; BEAN et *al.*, 1998 ; SAPIRSTEIN et FU 1998, WANG et KOVACS 2002c). Les résultats obtenus dans le tableau 19 confirment aussi que les gluténines insolubles représentent la fraction la plus importante dans la détermination des propriétés fonctionnelles des pâtes issues du blé dur.

SAPIRSTEIN et *al.* (2007) ont démontré que les propriétés technologiques reliées à la force du gluten de blé dur sont : le W alvéographique, le temps de développement au mixographe et au farinographe, le volume du pain ainsi que les gluténines insolubles. Ces auteurs ont trouvé des corrélations positives hautement significatives entre la force boulangère W, la ténacité P et les gluténines insolubles ($r=0,09$, $r=0,76$).

-Les teneurs en **SG-HPM des gluténines insolubles** en (%MS) sont corrélées positivement et significativement avec le gluten sec et humide ($r=0,610$, $r=0,580$).

YOUYOU (2012) a trouvé que les SG-HPM insolubles des farines de blé tendre sont associées positivement avec la force boulangère W et l'indice d'élasticité et à un degré moindre avec la ténacité, et le temps de pétrissage.

Des tests d'incorporations ont confirmé que les SG-HPM contribuent positivement à la qualité boulangère en augmentant la force et la stabilité de la pâte (BEKES *et al.*, 1995), mais les SG-HPM (20) expriment généralement des glutens de faible force contrairement aux SG-HPM (7+8) et SG-HPM (6+8) (SISSONS *et al.*, 2005b), par contre un rôle déterminant pour l'extensibilité de la pâte selon (SCHROPP et WIESER, 1996).

-Les teneurs en **SG-FPM des gluténines insolubles** par rapport aux protéines totales sont corrélées positivement et de manière hautement significative à la force boulangère W, la ténacité P et au gluten humide ($r= 0,798$, $r= 0,714$, $r=0,669$), positivement et significativement au temps de développement (TD2), la teneur en gluten sec (GSc) et gluten index (GIx) ($r=0,739$, $r=0,590$, $r=0,586$) et des corrélations négatives aux tests SDS1 et SDS2 sont observées ($r= -0,660$, $P<0,05$, $r= -0,705$, $P<0,01$).

Par rapport à la matière sèche, ces protéines sont corrélées positivement et de manière hautement significative à la force boulangère W, la ténacité P et la teneur en gluten humide et sec ($r= 0,877$, $r= 0,832$, $r=0,843$, $r=0,834$), positivement et significativement au le temps de développement TD2, la stabilité de la pâte et le gluten index GIx ($r=0,758$, $r=0,770$, $r=0,544$) et des corrélations négatives à l'affaiblissement au farinographe et aux tests SDS1 et SDS2 sont observées ($r= -0,700$, $r= -0,584$, $r=-0,597$, $P<0,05$).

GUPTA *et al.* (1991) ont trouvé des corrélations positives entre les SG-FPM et l'extensibilité de la pâte. L'incorporation des SG-FPM contribuent à l'amélioration de la force de la pâte (LEE *et al.*, 1999 ; SOISSONS *et al.*, 1998) bien qu'elles participent moins à l'extensibilité comparées aux SG-HPM.

-La teneur en **gluténines totales GT** par rapport aux protéines totales est corrélée positivement et de manière hautement significative à la force boulangère W ($r=0,743$), positivement et significativement à la ténacité P, le temps de développement TD2 la stabilité et le gluten humide ($r= 0,719$, $r=0,734$, $r=0,716$, $r=0,570$) mais négativement avec les tests SDS1 et SDS2 et l'affaiblissement AFF2 ($r= -0,657$, $P<0,05$, $r= -0,711$, $P<0,01$, $r= -0,668$, $P<0,05$).

Par rapport à la matière sèche, les gluténines totales sont corrélées positivement et de manière hautement significatives à la force boulangère W, la ténacité P, le gluten humide, le gluten sec et la stabilité ($r=0,816$, $r=0,837$, $r=0,829$, $r=0,867$), positivement et significativement au temps de développement TD2 ($r=0,731$). Des corrélations négatives et significatives sont observées avec l'affaiblissement au farinographe AFF2 ($r= -0,760$).

EDWARDS *et al.* (2001) ont conclu que les gluténines participent à l'élasticité de la pâte. D'autre part, EDWARDS *et al.* (2003), trouvent que l'addition de gluténines à une semoule basse améliore considérablement les paramètres de force de la pâte. Ils ont observé une réduction de l'élasticité avec l'augmentation des gluténines incorporées dans le blé dur.

-Les **protéines polymériques** par rapport aux protéines totales sont corrélées positivement et de manière hautement significative à la ténacité (P) et la force boulangère (W) ($r=0,697$, $r=0,683$) et significativement à la hauteur de développement (HD), la stabilité, la teneur en gluten humide et gluten sec ($r=0,574$, $r=0,689$, $r=0,595$, $r=0,616$), et négativement corrélées à l'affaiblissement et aux tests SDS1 et SDS2 ($r= -0,668$, $P<0,05$, $r= -0,643$, $P<0,05$, $r= -0,663$, $P<0,01$) respectivement.

Par rapport, à la matière sèche, ces protéines sont corrélées positivement et de manière hautement significative à la force boulangère (W), la ténacité (P), la teneur en gluten humide et sec ($r=0,713$, $r=0,668$, $r=0,764$, $r=0,840$), et positivement et significativement à la stabilité ($r=0,719$), et négativement et significativement à l'affaiblissement de la pâte (AFF2) ($r= -0,668$). EDWARDS *et al.* (2004) ont trouvé des corrélations positives entre les protéines polymériques inextractibles dans le SDS (%Upp) et les paramètres de la force : (W) alvéographique, ténacité (P), mais aussi avec le gluten index le temps de développement de la pâte ($r=0,72$, $r=0,61$, $r=0,77$, $r=0,7$).

AMMAR *et al.* (2000) ont trouvé des corrélations positives entre les protéines polymériques dans la farine de blé dur et la force de la pâte (W), l'extensibilité et le volume du pain et constatent que la différence entre le blé dur et le blé tendre réside dans la différence quantitative des protéines mesurées par HPLC en estimant que les polymères protéiques sont plus élevés dans le cas du blé dur.

-Le **résidu protéique insoluble** par rapport aux protéines totales est corrélé négativement et significativement avec le temps de développement de la pâte ($r= -0,542$).

L'analyse des ratios protéiques permet de constater que :

-Le ratio **protéines monomériques/protéines polymériques** est corrélé négativement et de manière hautement significative à la ténacité (P), la force de la pâte (W) ($r = -0,715$, $r = -0,673$) et de façon significative aux glutens sec, humide et gluten index ($r = -0,600$, $r = -0,563$, $r = -0,572$). Il est positivement corrélé aux tests SDS1 et SDS2 ($r = 0,721$, $r = 0,770$, $P < 0,01$). Cela veut dire que plus les protéines monomériques sont présentes, moins la force de la pâte est importante et vis versa. BELALOUÏ (2012) a trouvé aussi des corrélations négatives avec la force boulangère (W) et la ténacité (P) de la pâte sur des échantillons de farine de blé tendre ($r = -0,5393$ $P < 0,01$, $r = -0,4020$, $P < 0,05$)

AMMAR et *al.* (2000) n'ont pas observé de corrélations entre le ratio protéines polymériques/protéines monomériques avec la force boulangère et le volume du pain.

-Le ratio **SG-FPM/SG-HPM** insolubles est corrélé positivement et significativement à la force boulangère W ($r = 0,625$).

EDWARDS et *al.* (2007) ont trouvé des corrélations négatives entre le ratio SG-HPM/SG-FPM et le P, L, W alvéographiques, ainsi qu'avec le temps de développement et la hauteur de développement au mixographe, ces corrélations sont faibles ($r = -0,08$, $r = -0,20$). En effet, lorsque la proportion des SG-HPM augmente, la force diminue, ce qui n'a pas été observé par SISSONS et *al.* (2007).

Tableau 19: Corrélations entre les fractions protéiques et les paramètres technologiques de la pâte.

| | P | W | P/L | TD1 | HD | TD2 | Stab | Aff.2 | SDS.1 | SDS.2 | GH | GSc | GIx |
|---------------------------|---------|---------|-------|--------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| PM%PT | -,645* | -,635* | | | | | | | ,689** | ,760** | -,536* | | -,708** |
| GS%MS | ,598* | | ,589* | | | | ,884** | -,827** | | | | ,629* | |
| SG-FPM ins %PT | ,714** | ,798** | | | | ,739* | | | -,660* | -,705** | ,669** | ,590* | ,586* |
| SG-FPM Ins%MS | ,832** | ,877** | | | | ,758* | ,770* | -,700* | -,584* | -,597* | ,843** | ,834** | ,544* |
| SG-HPM Ins %MS | | | | | | | | | | | ,580* | ,610* | |
| GI%PT | ,739** | ,803** | | | | ,752* | | | -,682** | -,723** | ,706** | ,625* | ,586* |
| GI%MS | ,830** | ,853** | | | | ,743* | ,749* | -,682* | -,571* | -,577* | ,859** | ,856** | |
| RI%PT | | | | -,542* | | | | | | | | | |
| GT%PT | ,719* | ,743** | | | | ,734* | ,716* | -,668* | -,657* | -,711** | ,570* | | |
| GT%MS | ,837** | ,816** | | | | ,731* | ,829** | -,760* | | | ,829** | ,867** | |
| PRO POL%PT | ,697** | ,683** | | | ,574* | | ,689* | -,668* | -,643* | -,663* | ,595* | ,616* | |
| PRO.POL%MS | ,713* | ,668** | | | | | ,719* | -,694* | | | ,764** | ,840** | |
| PM/PRO POL | -,715** | -,673** | | | | | | | ,721** | ,770** | -,600* | -,563* | -,572* |
| SG-FPM/SG-HPM Ins. | | ,625* | | | | | | | | | | | |

** La corrélation est significative au niveau 0.01.

* La corrélation est significative au niveau 0.05.

CONCLUSION

Les opérations de mouture engendrent des produits de différentes caractéristiques physico-chimiques, biochimiques et technologiques selon leur provenance histologique.

➤ Les paramètres physico-chimiques révèlent des indices de colorations (IJ et IB) faibles et des teneurs en cendre qui augmentent du centre vers la périphérie du grain. La granulométrie est homogène dans l'ensemble et très fine dans le cas de la 3SF « LA BELLE ». Elle est corrélée positivement à l'indice de jaune et négativement au taux de cendres.

➤ Les analyses biochimiques indiquent que la teneur en protéines évolue considérablement avec la progression de la mouture, ainsi, les fractions protéiques se répartissent différemment dans les farines et semoules de blé dur.

Pour les farines, les gluténines insolubles, les rapports PM/Pr.POL et SG-FPM/SG-HPM insolubles diminuent avec l'avancement de la mouture, à l'inverse des protéines monomériques et des gluténines solubles. Les semoules possèdent des teneurs plus élevées en gluténines (SG-HPM et SG-FPM Ins) et en protéines polymériques.

➤ Sur le plan technologique, les farines et semoules présentent des volumes de sédimentation faibles. Les FPG et les semoules possèdent les teneurs en gluten sec (GSc) et en gluten humide (GH) les plus élevées, mais le gluten index (GIx) indique que la force des farines périphériques est la plus faible. La majorité des fractions contient un gluten à force moyenne sauf pour la 3SF et la 3SE « ERIAD » ainsi que la 3SE « LA BELLE » qui possèdent un gluten fort. L'extractibilité du gluten diminue avec l'avancement de la mouture.

L'indice de chute des farines/semoules est élevé et révèle ainsi que toutes les fractions étudiées sont hypo-diastasiques.

L'analyse des paramètres alvéographiques montre que les fractions de mouture de blés durs algériens ont des ténacités élevées, de faibles extensibilités avec des rapports de configuration déséquilibrés et élevés.

Les paramètres mixographiques et farinographiques indiquent que les farines périphériques ont un pouvoir d'absorption supérieur à ceux des farines centrales. Les fractions (3SF) et (3SE) présentent les temps de développement les plus longs, les meilleures stabilités et une bonne résistance au pétrissage.

D'après les résultats technologiques, les semoules présentent les glutens les plus forts suivies des farines de la (3SF), des (FCG) puis les (FPG) respectivement, et ce malgré la richesse en protéines des farines périphériques. Ceci pourrait être expliqué par la différence qualitative de la composition protéique formant le réseau glutineux et qui dépend de l'origine histologique du grain de blé dur.

➤ L'étude des corrélations entre les paramètres de qualité montre :

- des corrélations positives et hautement significatives entre la force W et la ténacité (P), avec le temps de développement (TD2), la stabilité, le gluten sec et humide et à un degré moindre avec le temps de développement (TD1) et le gluten index (GIx), mais négativement corrélé à l'affaiblissement (AFF2).

Ces résultats confirment le fait que la force des blés dur est favorisée par leur grande ténacité.

-les teneurs en protéines totales sont corrélées positivement et significativement aux différentes fractions protéiques exprimées en (% MS), à la ténacité (P), à l'absorption d'eau au farinographe et aux teneurs en gluten sec et humide.

-les teneurs en protéines monomériques (%PT) sont associées négativement et significativement aux paramètres de force de la pâte (ténacité, force, gluten index), et gluten humide et positivement aux tests SDS1 et SDS2.

-les gluténines solubles (%MS) sont corrélées positivement à la ténacité, rapport P/L et à la stabilité, mais négativement corrélées à l'affaiblissement (AFF2).

-les teneurs en gluténines insolubles et les SG-FPM insolubles, les gluténines totales et les protéines polymériques en (%PT) ou en (%MS) sont associées positivement à la ténacité, la force de la pâte W, le temps de développement (TD2), le gluten humide et le gluten sec. Aussi, les SG-FPM et gluténines insolubles et totales exprimées en (% MS) sont associées positivement et significativement au temps de développement de la pâte et la stabilité, et inversement corrélées à l'affaiblissement AFF2 et aux tests SDS1 et SDS2.

Ces résultats montrent l'importance des gluténines insolubles et les SG-FPM dans la détermination de la force de la pâte.

-le ratio protéines monomériques/protéines polymériques est associé négativement à la force W, la ténacité de la pâte, le gluten sec et humide et positivement aux tests SDS1 et SDS2, ainsi, plus ce ratio est élevé, plus la force est faible.

-inversement les ratios des sous-unités de gluténines SG-FPM/SG-HPM des gluténines insolubles sont associés positivement et significativement au W alvéographique, autrement dit plus la proportion de gluténines à faible poids moléculaire augmente par rapport aux gluténines HPM plus la force augmente.

Sur un plan pratique, cette étude indique que les échantillons de semoules et de farines de blé dur étudiés semblent inappropriés à la panification en l'état. Toutefois, les farines «3SF» et les semoules présentent relativement les meilleures aptitudes technologiques.

Dans la perspective de mieux valoriser les produits de mouture de blé dur, ce travail mériterait d'être poursuivie par:

- la réalisation d'essais de panification sur les différentes fractions de mouture de blé dur.
- l'amélioration des propriétés fermentatives par un apport d'amylases fongiques ou de malt.
- l'amélioration des propriétés plastiques par l'ajout d'améliorants tels que d'acide ascorbique.
- réalisation de mélanges (coupages) entre les farines/semoules de blé dur et les farines de blé tendre à des proportions différentes.
- optimiser un protocole de panification qui convient le mieux au blé dur.
- étudier les bases génétiques de la variabilité de la composition protéique en vue d'identifier les marqueurs de qualité.
- étudier d'autres composantes biochimiques telles que l'amidon endommagé, les pentosanes, les lipides et leurs rôles dans la panification du blé dur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AACC 54-40 A, 1983. American association of cereal chemists. Approved method of the AACC. Method 54-40 approved in (1961). AACC, St Paul, Minnesota.

ABECASSIS J., 1987. La mouture d'essais de blé dur. Recherches et applications industrielles. Mémoire d'ingénieur. Ed : Ecole National Supérieure de Meunerie et des Industries Céréalières (ENSMIC). 146p.

ABECASSIS, J., 1990. La filière blé dur et pâtes alimentaire : apports complémentaires de la technologie et de la génétique dans l'amélioration de la qualité. I.A.A. V 107, n. 6, pp. 1010- 1013.

ABECASSIS J., 1993. Nouvelles possibilités d'apprécier la valeur manière et la valeur semoulière des blés. Industries des céréales, n.8, pp. 25-37.

ABECASSIS J., 1996. Comprendre la qualité : la valeur semoulière, comment s'explique-t-elle ? Coll, perspectives blé dur INRA. Montpellier, France. 37-56.

ABECASSIS J., 1998. La mouture du blé dur. Les industries de première transformation des céréales. GODON B. et WILLM C. Ed : Tec & Doc, Paris, Lavoisier, pp. 362-377.

ABECASSIS J. et ALAUSE J., 1979. Farbton indices und kochqualität von mahlerzeugnissen aus Durum weizen sorten. Getreide Mehl und Brot, vol. 33, n. 3, pp 71-76.

ABECASSIS J et FEILLET J., 1985. Pureté des semoules du blé dur, taux de cendres et réglementation. Industries des céréales, n. 36, p p. 13-18.

ABECASSIS J. et CHAURAND M., 1997. Appréciation de la valeur d'utilisation du blé dur en semoulerie et pastification. In : GODON B. et WILLM C. Guide pratique d'analyse dans les industries des céréales. Ed : Tec & Doc, Paris, Lavoisier, 2ème édition, 226p.

AIT SIDHOUM A. et BENDJABEUR S., 2009. Appréciation de la qualité technologique de quelques variétés et lignés de blé dur nouvellement introduites en Algérie. Mém. Ing. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, El Harrach , Alger, 80p.

AMMAR K., KRONSTAD W. E. et MORRIS C. F., 2000. Breadmaking quality of selected durum wheat genotypes and its relationship with high molecular weight glutenin subunits allelic variation and gluten protein polymeric composition. Cereal Chemistry, n. 77, pp. 230-236.

AMMOUCHE Z., 2002. Etude biochimique et de la valeur nutritive de quelques légumineuses (fève, Fèverole, et pois chiche) : Possibilité d'incorporation dans les produits céréaliers. Thèse de Magister, Institut National Agronomique, El Harrach, 87p.

AUTRAN J. C., ABECASSIS J. et FEILLET P., 1986. Statistical evaluation of different technological and biochemical tests for quality assesment in durum wheat. *Cereal Chemistry*, vol. 63, n. 5, pp. 390-394.

AXFORD D. W. E., MCDERMOTT E. F. et REDMAN D. G., 1978. Small scale tests of breadmaking quality. *Milling Feed Fertilser*, vol. 161, n.5, pp. 18-20.

AXFORD D. W. E., MCDERMOTT E. F., et REDMAN D. G., 1979. Note on the sodium dodecyl sulfate test of breadmaking quality: comparison with PELSHENKE and ZELENY test. *Cereal Chemistry*, vol. 56, p.p. 582-584.

BAKHSHI A. K. et BAINS G. S., 1987. Study of the physico-chemical, rheological, baking and noodle quality of improved durum and bread wheat cultivars. *Journal of Food Science. Technol.*, n. 24, pp. 217-221.

BARD M., 1997. Le cahier de charge des farines : signification, interprétation, limites des mesures analytiques. *Industries des céréales*, n.103, pp.7-13.

BARRON C. M., SAMSON M. F., LULLIEN-PELLERIN V., et ROUAUX X., 2011. Wheat grain tissue proportions in milling fractions using biochemical marker measurements: Application to different wheat cultivars. *Journal of Cereal Science*, n. 53, pp. 306-31.

BEAN S. R., LYNE R. K., YILLEY K. A., CHUNG O. K. et LOOKHART G. L., 1998. A rapid method for quantification of insoluble polymeric proteins in flour. *Cereal Chemistry*, vol. 75, n. 3, pp. 374-379.

BEKES F., GRAS P. W. et GUPTA R. B., 1995. Proceedings of the 45 th Australian Cereal Chemistry Conference. Royal Australian Chemical Institute, North Melbourn, pp. 92-98.

BELALOUI D., 2012. Contribution à une meilleure connaissance des relations entre la composition protéique des farines et leurs caractéristiques alvéographiques. Thèse de magistère, INA, El-Harrach, Algérie, 93p.

BENBELKACEM. A., SADLI. F et BRINIS. L., 1995. La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie. CIHEAM. Option méditerranéenne, pp. 61-65.

BERLAND S. et ROUSSEL P., 2003. Qualité technologique. Synthèse du comité français de la semoulerie industrielle. Document de l'École Nationale Supérieure de Meunerie et des Industries Céréalières (ENSMIC), Surgères, France.

BERLAND S. et ROUSSEL P., 2005. Qualité technologique. Document de École Nationale Supérieure de Meunerie et des Industries Céréalières (ENSMIC), Surgères, France.

BOGGINI G. et POGNA N. E., 1989. The breadmaking quality and storage protein composition of durum wheat. *Journal of Cereal Science*, n. 9, pp. 131-138.

BOGGINI G., PALUMBO M. et BIANCARDI A. M., 1988. Panificabilità delle varietà di grano duro. Risultati di un triennio di prove. *Tecnica Molitoria*, n. 7, pp. 609-617.

BOGGINI G., TUSA P. et POGNA N. E., 1994. Qualità panificatoria di genotipi di grano duro a composizione proteica "atipica". *Tecnica Molitoria*, n. 8, pp. 825-835.

BOGGINI G., TUSA P. et POGNA N. E., 1995a. Protein composition and bread making quality of durum wheat. In: *Proc. Wheat Kernel Protein, Molecular and Functional Aspects*. Un. Studi Tuscia and CNR, pp. 291-293.

BOGGINI G., TUSA P., et POGNA N. E., 1995b. Bread making quality of durum genotypes with some novel glutenin compositions. *Journal of Cereal Science*, n. 22, pp. 105-113.

BOGGINI G., PAGANI M. A., LUCISANO M., 1997. Qualità panificatoria di miscele di sfarinati di frumento duro con farine di frumento tenero. *Tecnica Molitoria*, n. 48, pp. 781-91.

BOGGINI G., TUSA P., DI SIKVESTRO S. et POGNA, N. E., 1998. Agronomical and quality characteristics of durum wheat lines containing the 1BL/1RS translocation. *J. Genet. Breed.*, n. 53, pp. 167-172.

BORRELLI G. M., De LEONARDIS A. M. , PLATANI A. et TROCCOLI A., 2008. Distribution along durum wheat kernel of the components involved in semolina colour. *Journal of Cereal Science*, n. 48, pp. 494-502.

BORRELLI G. M., DE LEONARDIS A. M., FARES C., PLATANI C., et DI FONZO N., 2003. Effect of 105trench processing conditios on oxidative properties of semoulina dough and pasta. *Cereal Chemistry*. N. 80, pp. 225-231.

BOUDREAU A. et MENARD G., 1992. Le blé : éléments fondamentaux et transformation. Ed : Les presses de l'université LAVAL. 439 p.

BOYACIOGLU M. H. et UNAL S. S., 1992. Effect of particle size on mineral constituent and pigment content of semolina. *Pasta. J.*, 74, 3, pp. 40-42.

BOYACIOGLU M. H. et D'APPOLONIA B. L., 1994a. Characterization and utilization of durum wheat for breadmaking. I. Comparison of chemical, rheological, and baking properties between bread wheat flours and durum wheat flours. *Cereal Chemistry*, n. 71, pp. 21-28.

BOYACIOGLU M. H. et D'APPOLONIA B. L., 1994b. Characterization and utilization of durum wheat for breadmaking. III. Staling properties of breadbaked from bread wheat flours and durum wheat flours. *Cereal Chemistry*, n. 71, pp. 34-41.

BRANLARD G. et LE BLANC A., 1985. Les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire des blés tendres et des blés durs cultivés en France. *Agronomie*, n. 5, pp. 467-477.

BRITES C. et CARRILLO J. M., 2001. Influence of high molecular weight (HMW) and low molecular weight (LMW) glutenin subunits controlled by Glu-1 and Glu-3 loci on durum wheat quality. *Cereal Chemistry*, n. 78, pp. 59-63.

BRITES C., ROMANO M., YASQUE, J. et CARRILL O. J., 1997. Composizioni proteica, in fase di immagazzinaggio delle varietà partoghesi di *Triticum durum*: Rapports con la qualità di fabbricazione della pasta *Tecnica Malitoria*, vol. 48, n. 2, 167 p.

BULEON. A., COLONNA. P et LELOUP. V., 1990. Les amidons et leurs dérivés dans les industries des céréales. *Industries agro-alimentaires*, pp.515-532.

CALVEL R., 1973. L'évolution de la qualité du pain français. *Bull. Anc. Elèves, E.F.M.*, 254, pp. 59-71.

CALVEL R., 1980. *La boulangerie moderne*. 9^{ème} Ed. Eyrolles, Paris, pp. 11-64.

CALVEL, R. 1984. *La boulangerie moderne*. 10^{ème} Ed. Eyrolles, Paris, 460 p.

CAPOCCHI A., GALLESCHI L., et SAVIOZZI F., 2000. Isolation of wheat high molecular weight glutenin subunits from durum wheat. *Cereal Chemistry*, vol. 77, n. 2, pp. 105-106.

CARRILLO J. M., VAZQUEZ J.F. et ORELLANA J., 1990. Relationship between gluten strength and glutenin proteins in durum wheat cultivars. *Plant Breeding*, n.104, pp. 325-333.

CARRILLO J. M., MARTINEZ M. C., MOITA C., BRRITES M. T. ,NIETO TALADRIZ M. T. et VAZQUEZ J.F., 2000. Relationship between endosperm proteins and quality in durum wheat (*Triticum turgidum* L.var. durum). CIHEAM, Options Méditerranéennes, n. 40, pp. 463–467.

CEOLONI C., BIAGGETTI M., CIUFFI, M., FORTE P. et PASQUINI M., 1996. Wheat chromosome engineering at the 4x level: The potential of different alien gene transfers into durum wheat. *Euphytica*, n. 89, pp. 87-97.

CHIAVARO E., VITTADINI E., MUSCI M., BIANCHI F., et CURTI E., 2008. Shelflife stability of artisanally and industrially produced durum wheat sourdough bread (“Altamura bread”). *Food Science and Technology*, n. 41, pp. 58-70.

CHOPIN. Etude du blé dur à l’alvéographe. www.chopin-sa.com

CHUNG O.K., OHM J.B., CALEY M.S. et SEABOUM B.W., 2001. Prediction of baking characteristics of hard winter wheat flours using computer analysed mixograph parameters. *Cereal Chemistry*, n. 78, pp. 493-497.

CIAFFI M., LAFIANDRA D., TURCHETTA T., RAVAGLIA S., BARIANA H., GUPTA R., MACRITCHIE F., 1995. Breadmaking potential of durum wheat lines expressing both X- and Y- type subunits at the Glu-A1 locus. *Cereal Chemistry*, n. 72, pp. 465-469.

CLARKE F. R., CLARKE J. M., AMES, N. A. et KNOX, R. E., 2004 . Environmental effects on measurement of gluten index and SDS sedimentation volume in durum wheat. In: The proceedings of the 8th Gluten Workshop, 8-10 September 2003. Viterbo (Italy). *The gluten proteins*. Cambridge, The Royal Society of Chemistry, p.192-195.

COLAS A., 1997. Dosage des cendres et matière minérale. In : GODON B. et WILLM C. *Guide pratique d’analyse dans les industries des céréales*. Ed : Tec & Doc, Paris, Lavoisier, 2^{ème} édition, 226 p.

COLAS. A et PETEL. D., 1984 : Analyse physique des farines. In : GODON B. et WILLM C. *Guide pratique d’analyse dans les industries des céréales*. Ed : Tec & Doc, Paris, Lavoisier, 2^{ème} édition, 226 p.

CUBADDA R. et CARCEA M., 1994. Evaluation of gluten strength in durum wheat and semolina by rapid methods ; *Italian Food et Beverage Technology-IV*, pp. 15-19.

CUBADDA R., CARCEA M. et PASQUI L., 1992. Suitability of the gluten index test for assessing gluten 108trench in durum wheat and 108trench. *Cereal Foods Worls*, n. 37, pp. 866-869.

CUBADDA F., AURELI F., RAGGI A. et CARCEA M., 2009. Effect of milling, pasta making and cooking on minerals in durum wheat. *Journal of Cereal Science*. N. 49, pp. 92-97.

DACOSTA Y., 1986. Le gluten de blé et ses applications. Ed : APRIA, Paris, pp. 18-63.

DAMIDAUX R., AUTRAN J. C. et Feillet P., 1980. Gliadin electrophoregrams and measurements of gluten viscoelasticity in durum wheats. *Cereal Food World*, n. 25, pp. 754-756.

DEL FRATE R. 2005. Mieux connaitre la farine. Spécial Analyses. Supplément technique, I.N.B.P., Laboratoire d'Essais des Matériels et Produits Alimentaires (L.E.M.P.A), n. 85, 16 p.

DEXTER J. E., 2003. Pasta. In: HAMER R. J., 2003. *Gluten. Progress in Biotechnology*, vol. 23, pp. 112-114.

DEXTER J. E. et MARCHYLO B. A., 2000. Recent Trends in Durum Wheat Milling and Pasta Processing: Impact on durum wheat quality requirements, International Workshop on Durum Wheat, Semolina and Pasta Quality: Recent Achievements and New Trends, Proceedings, p. 139-164.

DEXTER J. E. et MATSUO R. R., 1978. The effect of gluten protein fractions on pasta dough rheology and spaghetti-making quality. *Cereal Chemistry*, n. 55, pp. 44-57.

DEXTER J. E. et MATSUO R. R., 1980a. Glutenin, proteins and gluten strength in durum wheat. *J. Agric. Food Chem.*, n. 28, pp. 899-902.

DEXTER J. E. et MATUSO R. R., 1980b. Relationship between durum wheat protein strengths and pasta dough rheology and spaghetti cooking quality. *J Agric. Food Chem.*, n. 28, pp. 899-902.

DEXTER J. E. et MATUSO R. R., 1987. Effect of semolina extraction rate on semolina characteristics and spaghetti quality. . *Cereal Chemistry*, n. 55, p. 841.

DEXTER J. E., SYMONS S.J. et MARTIN D. G., 1994a. Enhancement of durum wheat milling quality by preprocessing and an evaluation of strength ng imaging as a rapid technique

for monitoring preprocessing efficiency. Association Operative Millers Bulletin, pp. 6415-6420.

DEXTER J.E., MATUSO R. R., PRESTON K. R. et KILLBORN R. H., 1981. Comparison of gluten strength, mixing properties, baking quality and spaghetti quality of some Canadian durum and common wheats. *Can. Inst. Food Sci. Tech. J.*, n . 14, pp. 108-111.

DEXTER J. E., PRESTON K. R., MARTIN D. G. et GANDER E. J., 1994b. The effects of protein content and starch damage on the physical dough properties and bread-making quality of Canadian durum wheat. *Journal Of Cereal Science* , n. 20, pp. 139-151.

DEXTER J. E., MARCHYLO B. A., PRESTON K. R., CLARKE J. M. et CARCEA M., 1998. Comparison of the quality characteristics of some Italian and North American durum wheat cultivars. In: *Wheat Protein Production and Marketing, Proc. of the Wheat Protein Symposium*, Fowler, GEDDES D. B., JOHNSTON W.E., A.M. and PRESTON K. R., 1998. Eds. Saskatoon. University of Saskatchewan, Saskatoon, pp. 234-239.

DICK J. W., 1981. Basic structure of durum wheat 109trength109ng its unique chemical, physical and quality characteristics. *Macaroni J.*, pp. 63-35.

DICK J.W., QUIK J. S., 1983. A modified screening test for rapid estimation of gluten strength in early-generation durum wheat breeding lines. *Cereal chemistry*, vol. 60, n. 6, pp. 315-318.

DICK, J. W., et MATSUO, R. R. 1988. Durum wheat and pasta products. In: *Wheat Chemistry and Technology*, 3rd ed., Vol. 1. Y. Pomeranz, ed. Am. Assoc. . Cereal Chemistry : St. Paul., pp. 507-547.

DJEMA I., 2000. Influence du taux d'extraction et de la granulométrie de la semoule sur la qualité technologique du couscous de blé dur. Thèse Magister. Institut National Agronomique, El Harrach, Alger, 84p.

DUBOIS. M., 1996. Les farines : caractéristiques des farines et des pâtes. *Industries des céréales*, n.97, pp. 19-29.

DU CROS D. L., 1987. Glutenin proteins and gluten strength in durum wheat. *Journal of Cereal Science*, n. 5, pp. 3-12.

DU CROS D. L., RIGLY C. W. et HARE R. A., 1982. Prediction of durum wheat quality from gliadin protein composition. *Aust. J. Agric. Res.*, v. 33, pp. 429-442.

EDWARDS N. M. et DEXTER J. E., 1987. Alveograph—sources of problems in curve Interpretation with hard common wheat flour. Canadian Institute of Food Science and Technology, n. 20, pp. 75–80.

EDWARDS N. M., PERESSINI D., DEXTER J. E. et MULVANEY S. J., 2001. Viscoelastic properties of durum wheat and common wheat dough of different strengths. Rheologica Acta, vol. 40, n. 2, pp. 142-153.

EDWARDS N. M., MULVANEY S. J., SCANLON M. G. et DEXTER J. E., 2003. Role of gluten and its components in determining durum semolina dough viscoelastic properties. Cereal Chemistry, n. 80, pp. 755-763.

EDWARDS N. M., GIANIBELLI M. C., AMES N. P., CLARKE J. M. DEXTER J. E., LARROQUE O. R. et Mc CAIG T. N., 2004. Durum wheat dough trength relationship to polymeric protein quantity and composition. In : LAFIANDRA D. MASCI S. et D’OVIDIO R. Gluten proteins, pp. 132-135.

EDWARDS N. M., PRESTON K. R., PAULLEY F. G. ,GIANIBELLI M. C., Mc CAIG T. N., CLARK J. M., AMES N. P. et DEXTER J. E., 2007. Hearth bread baking quality of durum wheat varying in protein composition and physical dough properties. Journal of the Science of Food and Agriculture, n. 87, pp. 2000-2011.

ELIAS E. M., 1995. Durum wheat products. CIHEAM-IAMZ, n. 22,pp. 23-31.

EUROPEAN UNION, 2003. Official J. Europ. Union L181 (19 juillet), EC Régulation 1291/2003., n. 46, pp 12-19.

EVERS T., et MILLART S., 2002. Cereal grain structure and development: some implication for quality. Journal Of Cereal Science, n. 26, pp. 261-284.

FAVIER, J. C., IRELAND RIPERT, J., TOQUE, C., et FEINBERG, M. 1995. Répertoire général des aliments : table de composition. ED : Technique et Documentation, 2ème édition, Paris, Lavoisier, 897p.

FEILLET P., 1988. Protein and enzyme composition of durum wheat. In: Durum Wheat: Chemistry and Technology. FABRIANI G. et LINTAS C., Assoc. . Cereal Chemistry, St. Paul, MN., pp. 93-119.

FEILLET P., 2000. Le grain de blé : Composition et utilisation. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 308 p.

FEILLET P., JEANJEAN M. F., KOBREHEL K., et LAIGNELET B., 1974. Le brunissement des pâtes alimentaires. Bulletin ENSMIC, n. 262, pp. 190-194.

FERRANTE P., GIANIBELLI M. C., LARROQUE O., VOLPI C., D'OVIDIO R., DLAFIANDRA D. et MASCI S., 2006. Effect of incorporation of an i-type low-molecular-weight glutenin subunit and a modified γ -gliadin in durum and bread wheat doughs as measured by micro-mixographic analyses. Journal Of Cereal Science, n. 44, pp. 193-201.

FINNEY K. F., YAMAZAKI W. T., YOUNGS V. L. et RUBENTHALER G. L., 1987. Quality of durum wheat. In: Wheat and Wheat Improvement, 2nd ed., pp. 727-748

FLEURAT-LESSARD F., CHAURAND M., MARCHEGAY G. et ABECASSIS J., 2007. Effects of processing on the distribution of pirimiphos-methyl residues in milling fractions of durum wheat. Journal of Stored Products Research, n. 43, pp. 384–395

FOIS S., SANNA M., STARA G., ROGGIO T. et CATZEDDU P., 2011. Rheological properties and baking quality of commercial durum wheat meals used to make flat crispy bread. Eur. Food Res. Technol., n. 232, pp.713–722.

FRAIGNIER M.P., MICHAUX-FERRIERE N., KOBREHEL K., 2000. Distribution of peroxidase in durum wheat (*Triticum durum*). Cereal Chemistry. n. 77 ,pp. 11-17.

FU B. X. et SAPIRSTEIN H. D., 1996. Procedure for isolating monomeric proteins and polymeric glutenin of wheat flour. Cereal chemistry, vol. 73, n. 1, pp. 143-152.

FU B. X. et KOVACS M. I. P., 1999. Rapid single-Step procedure for isolating total glutenin proteins of wheat flour. Journal of Cereal Science, vol. 29, n. 2, pp. 113-116.

FUSTIER P. J., 2006. Influence des fractions de mouture de blé tendre (farines patentes, de coupure et basse) sur les propriétés rhéologiques des pâtes et caractéristiques des biscuits. Thèse de Doctorat. Université LAVAL, Québec. 293 p.

GAZZA L., SGRULLETTA D., CAMMERATA A., GAZZELLOUNI G., PERENZIN M., et POGNA N. E., 2011. Pastamaking and breadmaking quality of soft-textured durum wheat lines. Journal of Cereal Science, n. 54, pp. 481-487.

GODON B. et WILLM C., 1998. Les industries de première transformation des céréales. Ed : Tec & Doc, Paris, Lavoisier, 656 p.

GUINET, R. et GODON, B., 1994. La panification française. Eds., Lavoisier-Apria, Technique et Documentation, Paris, 534 p.

GRABBERGER A., SCHIEBERLE P. et KOEHLER P., 2003. Fractionation and reconstitution of wheat flour- effect on dough rheology and baking. European Food Research Technology, n. 216, pp. 204-211.

GRESLE. E., 2000. Les caractéristiques des blés de récolte 1999, vues par la méthode Gluten index. Industries des céréales, n. 118, pp. 20-27.

GUPTA R B. et SHEPHERD K. W., 1988. Low –Molecular-Weight glutenin subunits in wheat: their variation, inheritance and association with breadmaking quality, pp. 943-949. In Proc. Int. Weat genet. Symp 7th Cambridge.

GUPTA R. B., BATEY I. L., MACRITCHIE F., 1992. Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. Cereal Chemistry, vol. 69, n. 2, p.p. 125-131.

GUPTA R. B., KHAN K. et Mac RITCHIE F., 1993. Biochemical basis of flour properties in bread wheat. I. effect of variation in the quantity and size distribution of polymeric protein. Journal of Cereal Science, n.18, pp. 23-41.

GUPTA R. B., Mac RITCHIE F., SHEPHERD K.W. et ELISSON F.W., 1991. Relative contribution of LMW and HMW subunits of glutenin to dough strength and dough stickiness of bread wheat. In: BUSHUK W., TKACHUK (Eds.), Gluten Proteins 1990. American Association of Cereal Chemistry, pp.71–80.

GUTIERREZ A., ABECASSIS J. et CUQ B., 1999. Facteurs physico-chimiques des propriétés d'hydratation des farines. Industries des céréales, n. 114, pp. 11-14

HAILU F., MERKER A., SINGH H., BELAY G., JOHANSSON E. et ZELEKE H., 2006. Composition of and variation in high- and low-molecular weight glutenin subunits, and omega gliadins in Ethiopian tetraploid wheat germplasm. Plant Genetic Resources , vol. 4, n. 2, pp. 134- 143.

HARELAND G.A. et PUH D.P., 1999. Baking performance of durum and soft wheat flour in a sponge-dough breadmaking procedure. . Cereal Chemistry, n.75, pp. 830-835.

HOULIAROPOULOS E., ABECASSIS J., et AUTRAN J.-C., 1981. Produits de mouture du blé dur : coloration et caractéristiques culinaires. Industries des céréales, n. 12, pp. 3-13.

IMPIGLIA A., NACHIT M., et PORCEDDU E., 1997. Profile electrophoretic non communi nelle razze native di fu mento du roe deffetti sulla tenacia del glutine:Tecnica Moliteria, vol. 48, n. 5, pp. 537-540.

IMPIGLIA A., NACHIT M. M., LAFIANDRA D., et PORCEDU E., 1995. Effect of gliadin and glutenin components on gluten strength in durum wheat. Centre International de Hautes études Agronomiques Méditerranéennes, pp. 167-172.

Institute Poligrafico e Zecca dello stato, 2004. Italian Official Bulletin (Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana), n. 51, pp. 58-60.

Institut Technique des Céréales et des Fourrages, Office National Interprofessionnel de Céréales, Association générale des producteurs de Maïs, 1995. Contrôle de la qualité des céréales et des protéagineux : guide pratique. ITCF, Paris, 253p.

IRVINE G.N., BRADLEY J. W. et MARTIN G. C., 1961. A farinograph technique for macaroni doughs. Cereal Chemistry, n. 38, pp. 153-164.

JEANTET. R., CROGUENNEC. T., SCHUCK. P et BRULE. G., 2007. Du blé au pain et aux pâtes alimentaires. In : Sciences des aliments, Biochimie-microbiologie-procédés-produits.V2 : Technologie des produits alimentaires. Ed : Tec & Doc, Paris, Lavoisier, pp. 137-180.

JIANG C., PEI Y., ZHANG Y., LI X., YAO D.,YAN Y., MA W., HSAM S. L. K et ZELLER F. J., 2008. Molecular cloning and characterization of four novel LMW glutenin subunit gene from *Aegilops longissima*, *Triticum dicoccoides* and *T. zhukovsky*. Hereditas., n. 145, pp. 92-98.

JOSEPHIDES C. M., 1996. Enzymatic activity of alpha-amylase on durum wheat grain produced under Cyprus conditions. Technical-Bulletin Agricultural Research Institute, Cyprus, n. 178, p. 8.

JOSEPHIDES C. M., JOPPA L. R. et YOUNGS V. I., 1987. Effect of chromosome 1B on gluten strength and other characteristics of durum wheat. *Crop Science*, n. 27, pp. 212-216.

Journal Officiel de la République Algérienne, 1991. Décret exécutif N° 91/572 du 31 décembre relatif à la farine de panification au pain.

Journal Officiel de la République Algérienne, 08 janvier 1992. n. 2.

Journal Officiel de la République Algérienne, 26 Décembre 2007 n. 80.

KERBER E. R., TIPPLES K. H., 1969. Effects of the D genome on milling and baking properties of wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, n. 49, pp. 255–263.

KITISSOU P., 1995. Un nouveau paramètre alvéographique: l'indice d'élasticité (Ie). *Industries des Céréales*, vol. 92, pp. 9-17.

KUNERTH W. et D'APPOLONIAB. L., 1985. Use of the mixograph and farinograph in wheat quality evaluation, p. 27. In: FARIDI H. *Rheology of wheat product*. Ed AM. Assoc. Cereal Chemistry., St Paul, Mn.

LADRAA N., 2012. Aptitude à la panification de quelques variétés de blé dur algérien. Thèse de Magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, El Harrach, Alger, 93p.

LAFIANDRA D., MARGIOTTA B., COLAPRICO G., MASCI S., ROTH M. R. et MACRITHIE F., 2000. Introduction of the D-genome related high and low molecular glutenin subunits into durum wheat and their affect on technological properties. In: *Gluten Proteins 2000*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, pp. 51-54.

LAIGNELET. B., KOBRETTEL. K et FEILLET. P., 1972. Le problème de la coloration des pâtes alimentaires. *Industries Alim. Agric.*, n.89, pp. 413-427.

LAMPIGNANO V., LAVERSE M., MASTROMATTEO M. et DEL NOBILE M. A., 2013. Microstructure, textural and sensorial properties of durum wheat bread as affectes by yeast content. *Food Research International*, n. 50, pp. 369-376.

LEE Y. K., BEKES F., GRAS P., CIAFFI M., MORELL M. K., et APPELS R., 1999. The low molecular weight glutenin subunit proteins of primitive wheats. IV. Functional properties of products from individual genes. *Theoretical and Applied Genetics*, n. 98, pp. 149–155.

LEMPEREUR I., CHAURAND J., ABECASSIS J., et AUTRAN J., 1997. Valeur semoulière des blés durs (*Triticum durum* Desf) : influence de la taille des grains. Industries des Céréales, n. 104, pp. 13-20.

LERNER S. E., COGLIATTI M., PONZIO N. R., SEGHEZZO M. L., MOLFESE E. R. et ROGERSW. J., 2004. Genetic variation for grain protein components and industrial quality of durum wheat cultivars sown in Argentina. Journal of Cereal Science, n. 40, pp. 161-166.

LINDHAL G. et ELIASSON A. C., 1992. A comparison of some rheological properties of durum and wheat flour dough. Cereal Chemistry, pp. 30-34.

LIU C. Y., et RATHJEN A. J., 1996. Association of high and low molecular weight glutenin subunits with dough strength in durum wheats [*Triticum turgidum* spp. *turgidum* L. conv. *durum* (Desf.)] in southern Australia. Austr. J. Exp. Agric., n. 36, pp. 451-458.

LIU C. Y., SHEPHERD K. W. et GRAS P. W., 1994. Grain yield and quality characteristics of chromosome 1D and 1B substitution lines in durum wheat and their F2 derived progeny lines I Comparison among the tetraploid types. Journal of Cereal Science, n. 20, pp. 20-32.

LIU C. Y., SHEPHERD K. W. et RATHJEN A. J., 1996. Improvement of durum wheat pastamaking and breadmaking qualities. Cereal Chemistry, n.73, pp. 155-166.

LIU C. Y., RATHJEN A. J., SHEPHERD K. W., GRAS P. W. et GILES L. C., 1995. Grain quality and yield characteristics of D- genome disomic substitution lines in Langdon (*Triticum turgidum* var. durum). Plant Breeding, n. 114, pp. 34-39.

LOPEZ-AHUMADA G.A., VALDEY-ENCINAS V.A. et RAMIREZ-WONG B., 1991. The use of a mix of emulsifiers to improve the baking characteristics of blends of durum and bakers wheat flour. Cereal Foods World, n. 36, pp. 701-702.

MAC RITCHIE F., 1992. Physicochemical properties of wheat proteins in relation to functionality. Adv. Food Nutr. Res., n. 36, pp. 1-87.

MAGHIRANG E. B., LOOKHART G. L., BEAN S. R., PIERCE R. O., XIE F., CALEY M. S., WILSON J. D., SEABOURN B. W., RAM M. S., PARK S. H., CHUNG O. K. et DOWELL F. E., 2006. Comparison of quality characteristics and breadmaking functionality of hard red winter and hard red spring wheat. Cereal Chemistry, n. 83, vol.5, pp. 520-528.

MARTINEZ M. C., RUIZ M., CARRILLO J. M., 2005. Effects of different prolamin alleles on durum wheat quality properties. *Journal of Cereal Science*, n. 41, pp. 123-131.

MATSUO R. R. et IRVINE G. N., 1970. Effect of gluten on the cooking quality of spaghetti. *Cereal Chemistry*, n. 47, pp. 173-180.

MAUZE C., RICHARD M., SCOTTI G., 1972. Guide pratique de l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages : Contrôle de la qualité des blés. Paris, 176p.

MEBTOUCHE K., 1998. Caractérisation technologique de quelques lignées de blé dur. *Céréaliculture*, ITGC, n.32, pp. 27-32.

MELAS V., MOREL M. H., AUTRAN J. C. et FEILLET P., 1994. Simple and rapid method for purifying low molecular weight subunits of glutenin from wheat. *Cereal Chemistry*, vol. 71, pp. 234-237.

MIRAD. Z., 1985. Incidence de l'incorporation de deux échantillons de 3SF à la farine panifiable. *C.E.R.E.A.L* , pp. 11-19.

MORAGUES M., ZARCO-HERNANDEZ J., MORALEJA A. et ROYO C., 2006. Genetic diversity of glutenin protein subunits composition in durum wheat landraces (*Triticum turgidum* ssp. *turgidum* convar. *durum* (Desf.) from the Mediterranean basin. *Genet. Resour. Crop Evol.*, n. 53, pp. 993-1002.

NAEGA, S. 2005. Wheat and flour testing methods : A guide to understanding wheat and flour quality. Wheat Marketing Center, Inc. Portland, Oregon, USA, 71 p.

NEACSU A., STANCIU G. et SAULESCU N. N., 2009. Most suitable mixing parameters for use in breeding bread wheat for processing quality. *Cereal Research Communication*, n. 37, pp. 83-92.

Norme algérienne (NA.730- 1991. ISO 520) : Détermination de la masse de 1000 grains.

Norme algérienne (NA. 733-1991, ISO 2171) : Détermination des cendres.

Norme algérienne (NA. 1133–1990, ISO 712) : Détermination de la teneur en eau.

Norme algérienne (NA. 1158–1990, ISO 1871) : Dosage de l'azote totale avec minéralisation selon la méthode KJELDAHL.

Norme algérienne (NA. 1183–1990) : Détermination du taux de mitadinage.

Norme Codex standard 178-1991. Norme Codex pour la semoule et la farine de blé dur. 3 p.

Norme française (NF. 03-703, ISO 3093 :2004). Détermination de l'indice de chute selon Hagberg- Petren : blé tendre, seigle et leurs farines, blés durs et leurs semoules.

Norme française (NF. 03-721, de juin 1994). Semoule de blé dur : détermination du taux d'affleurement.

Norme française (NF. ISO 5530-1 :1997) : détermination de l'absorption d'eau et des caractéristiques rhéologiques aux moyens du farinographe.

Norme I.S.O. 5530-04: Caractéristiques alvéographiques moyennes pour la panification.

OAK M. D. et DEXTER J. E., 2006. Chemistry, genetics and prediction of dough strength and end-use quality in durum wheat. In: Gliadin and Glutenin, AACC International, St. Paul, pp. 281-305.

OAK M. D., TAMHANKAR S. A., RAO V. S. et BHOSALE S. B., 2004. Relationship of HMW, LMW glutenin subunits and γ -gliadins with gluten strength in Indian durum wheats. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, n. 13, pp. 51-55.

OKANDZA Y., 2000. Cracterisation technologiques et biochimiques de quelques variétés de blé dur algérien. Thèse de Magister. Institut National Agronomique, El Harrach, Alger, 96p.

OSBORNE T. B., 1907. The proteins of wheat kernel. Carnegie, Inst, WASHINGTON DC. Publ. 84 p.

OZDEREN T., OLANCA B., SANAL T., OZAY B D. S., et KOKSEL H., 2008. Effects of suni-bug (*Eurygaster spp.*) damage on semolina properties and spaghetti quality characteristics of durum wheats (*Triticum durum* L.) . Journal of Cereal Science, n. 48, pp. 464-470.

PALUMBO M., SPINA A. et BOGGINI G., 2000. Agronomic and bread-making characteristics of durum wheat genotypes deriving from interspecific hybridation with bread wheat. Centre International de Hautes Etudes Agronomique Mediterraneennes (CIHEAM), Options Mediterraneennes. Serie A, n. 40, pp. 515-518.

PASQUALONE A., CAPONIO F. et SIMEONE R., 2004. Quality evaluation of re-milled durum wheat semolinas used for bread-making in Southern Italy. Eur. Food Res. Technol., n. 219, pp. 630-634.

PAYNE P.I., LAW C.N., MUDD E.E., 1980. Control by homoeologous group 1 chromosomes of the high-molecular-weight subunits of glutenin, a major protein of wheat endosperm. *Theoretical and applied genetics*, vol. 58, pp. 113-120.

PAYNE P. I., CORFIELD K. G., HOLT L.M. et BLACKMAN J. A., 1979. Identification of high-molecular-weight subunit of glutenin whose presence correlates with bread-making quality in wheats of related pedigree. *Theoretical and applied genetics*, vol. 55, pp. 153-159.

PAYNE P. I., HOLT L. M. , JACKSON E. A. et LAW C. N., 1984 . Wheat storage proteins : Their genetics and potential for manipulation by plant breeding. *Philos.Trans.R.sco. London*, B. n. 304, pp. 359-371.

PAYNE P. I., NIGHTINGALE M. A., KRATTIGER A. F., et HOLT L. M., 1987. The relationship between HMW glutenin subunit composition and the bread-making quality of British-grown wheat varieties. *J. Sci. Food Agric*, n. 40, pp. 51-65.

PENA R. J., 2000. Durum wheat for pasta and breadmaking. Comparaison of methods used in breeding to determine gluten quality-related parameters. *CIHEAM. Options méditerranéennes*, pp. 423-430.

PENA R. J., ZARCO-HERNANDEZ J., AMAYA-CELIS A. et MUJEEB-KAZI, A., 1994. Relationship between chromosome 1B-encoded glutenin subunit compositions and breadmaking quality characteristics of some durum wheat (*Triticum turgidum*) cultivars. *Journal of Cereal Science*, n. 19, pp. 243-249.

PERSINI D. E., EDWARDS. N. M., DEXLER. J. E., MULVAREY J. S., SENSIDONI A. et POLLINI C.s M., 1999. Rheological behaviour of durum wheat dough and their relation to baking and pasta quality, southern European conference in rheology, University of Colobia, Italy.

PEYRON S., SURGET A., MABILLE F., AUTRAN J. C., ROUAU X., et ABECASSIS J., 2002. Evaluation of tissue dissociation of durum wheat grain (*Triticum durum* Desf.) generated by the milling process. *Journal of Cereal Science*, n. 36, pp. 199-208.

POGNA N.E., MAZZA M., REDAELLI R. et NG P. K. W. 1996. Gluten quality and storageprotein composition of durum wheat lines containing the Gli-D1/Glu-D3 loci. In *Proc. 46th Australian Cereal Chemistry Conference in Association with 6th International Gluten*, pp. 18-22.

POGNA N. E., AUTRAN J. C., MELLINI F., LAFIANDRA D. et FEILLET P., 1990. Chromosome 1B-encoded gliadins and glutenin subunits in durum wheat: Genetics and relationships to gluten strength. *Journal of Cereal Science*, n. 11, pp. 15-34.

POMERANZ Y., 1983. Molecular approach to bread making an update and new perspectives. *The bakers digest*, pp. 12-20.

PORCEDDU E., TURCHETTA T., MASCI S. D., OVIDIO R., LAFIANDRA D., KASARDA D.D., IMPIGLIA A., et NACHIT M. M., 1998. Variation in endosperm protein composition and technological quality properties in durum wheat. *Euphytica*, n. 100, pp. 197-205.

POTUS. J., 1993. Influence des matières premières et des conditions de fabrication sur les réactions de Maillard en panification. *Industries agro-alimentaires*, pp.543-547.

PRESTON K. R., MARCH P. R. et TRIPPLES K. H., 1982. An assessment of the SDS-sedimentation test for the prediction of Canadian bread wheat quality. *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 62, p.p. 545-553.

PRESTON K. R., KILBORN R. H. et DEXTER J. E., 1987. Effect of starch damage and water absorption on the alveograph properties of Canadian hard red spring wheat. *Can Inst. Food Sci. Technol. J*, vol. 20, n. 2, pp. 75-80.

PRESTON K., R., LUKOW O. M. et MORGAN B., 1992. Analysis of relationships between flour quality properties and protein fractions in a world wheat collection. *Cereal Chemistry*, vol. 69, n. 5, p.p. 560-567.

QUAGLIA G. B., 1988. Other durum wheat products. In: *Durum Chemistry and Technology*, AACC International, pp. 263-282.

QUICK J.S. et DONNELLY B.J., 1980. A rapid test for estimating durum wheat gluten quality. *Crop Science*, n. 20, pp. 816-818.

QUICK J.S. et CRAWFORD, R. D., 1983. Bread baking potential of new durum wheat cultivars. In *Proc. 6th International Wheat Genetics*, p. 851-856.

RACITI C. N., DOUST M. A., LOMBARDO G. M., BOGGINI G. et PECETTI L., 2003. Characterization of durum wheat germplasm for high and low molecular weight glutenin subunits in relation with quality. *Europ. J. Agronomy*, n. 19, pp. 373-382.

RAFFIO A., PASQUELONE A., SINESIO F., PALETTI F., QUAGLIA G. et SIMOINE R., 2003. Influence of durum wheat cultivar on the sensory profile and staling rate of Altamura bread. *European Food Research and Technology*, n. 218, pp. 49-55 .

RANHOTRA G. S., GELROTH J. A., GLASER B. K. et POSNER E. S., 1992. Total and soluble fiber content of air-classified white flour from hard and soft wheats. *Cereal Chemistry*, n. 69, pp. 75-77.

RAO B. N., POZNIAK C. J., HUCL P. J. et BRIGGS C., 2010. Baking quality of emmer-derived durum wheat breeding lines. *Journal of Cereal Science*, n. 51, pp. 299–304.

RAO V. K., MULVANEY S. J., DEXTER J. E., EDWARDS N. M. et PERESSINI D., 2001. Stress-relaxation properties of mixograph semolina-water doughs from durum wheat cultivars of variable strength in relation to mixing characteristics, bread and pasta making performance. *Journal of Cereal Science*, n. 34, pp. 215-232.

REDAELLI R., POGNA N. E. et NG P. K. W., 1997. Effects of prolamins encoded by chromosomes 1B and 1D on the rheological properties of dough in near-isogenic lines of bread wheat. *Cereal Chemistry*, n. 74, pp. 102-107.

ROUSSEL P., 1984. Guide pratique d'analyse dans les industries des céréales: test de panification. Paris, Lavoisier, pp. 511-545.

ROYO C., ELIAS M. E. et MANTHEY F. A., 2009. Durum Wheat Breeding. In: *Handbook of plant breeding. Cereals*. Springer, pp. 198-219.

RUIZ M. et CARRILLO J.M., 1995. Relationships between different prolamin proteins and some quality properties in durum wheat. *Plant Breeding*, n. 114, pp. 40–44.

SAPIRSTEIN H. D. et FU B. X., 1998. Intercultivar variation in the quantity of monomeric proteins, soluble and insoluble glutenin, and residue protein in wheat flour and relationships to bread making quality. *Cereal Chemistry*, vol. 75, n. 4, pp. 500-507.

SAPIRSTEIN H. D., DAVID P., PRESTON K. R. et DEXTER J. E., 2007. Durum wheat breadmaking quality: Effects of gluten strength, protein composition, semolina particle size and fermentation time. *Journal of Cereal Science*, n. 45, pp. 150-161.

SCHOFIELD J.D. et BOOTH M.R., 1983. Wheat proteins and their technological significance. *Dev. Food Proteins*, n. 2, pp. 1-65.

SCHROPP P. et WIESER H., 1996. Effects of high molecular weight subunits of glutenin on the rheological properties of wheat gluten. *Cereal Chemistry*, n. 73, pp. 410-413.

SHEWRY P.R. et TATHAM A.S., 1990. The prolamine storage proteins of cereal seeds :Structure and evolution. *Biochem. J.*, n. 267, pp. 1-12.

SHEWRY P.R., NAPLER J.A. et TATHAM A.S., 1995. Seed storage proteins :structures and biosynthesis. *Plant Cell.*, n.7, pp. 945-956.

SHEWRY P. R., HALFORG N. G., BELTON P. S. et TATHAM A.S., 2002. The structure and properties of gluten: An elastic protein from wheat grain. *Philosophical Transactions Royal Society London*, n. 357, pp. 133-142.

SHEWRY P. R., TATHAM A. S., FORDE J., KREIS M. et MIFLIN B. J., 1986. The Classification and nomenclature of wheat gluten proteins. A reassessment. *Journal of Cereal. Science*, vol. 4, p.p. 97-106.

SHROPP P. et WIESER H., 1996. Effects of high molecular weight subunits of glutenin on the rheological properties of wheat gluten. *Cereal Chemistry*, n. 73, pp. 410–413.

SINGH N. K., DONAN O. R., et MACRITEHIC F., 1990. Use of sonication and size-exclusion HPLC in the study of wheat four proteins. II. Relative quality of gluten as a measure of bread-making quality. *Cereal Cheat*, n. 67, pp. 161-170.

SISSONS M., 2008. Role of Durum Wheat Composition on the Quality of Pasta and Bread. *Food*, Global Science Books, vol. 2, n. 2, pp. 75-90.

SISSONS M. J., EGAN N. E., et GIANIBELLI M. C., 2005a. New insights into the role of gluten on durum pasta quality using reconstitution method. *Cereal Chemistry*, n. 82, pp. 601-608.

SISSONS M. J., SOH H.N. et TURNER M. A., 2007. Role of gluten and its components in influencing durum wheat dough properties and spaghetti cooking quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, n. 87, pp. 1874-1885.

SISSONS M. J., AMES N. P., HARE R. A. et CLARKE J. M., 2005b. Relationship between glutenin subunit composition and gluten strength measurements in durum wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, n.85, pp. 2445-2452.

SOUTHAN M. et MACRITCHIE F., 1999. Molecular weight distribution of wheat proteins. *Cereal Chemistry*, n. 76, pp. 827-836.

SURGET A. et BARRON C., 2005. Histologie du grain de blé. *Ind. des céréales*, n. 145, pp. 3-7.

TATHAM A. S., FIELD J. M., SMITH S. J. et SHEWRY, P. R., 1987. The conformation of wheat gluten proteins 2. Aggregated gliadins and low molecular weight subunits of glutenin. *Journal of Cereal Science*, n. 5, pp. 203-214.

TIGROUDJA F. et BENDJOUADIOUADDA A., 1999. Influence de la granulométrie de la granulométrie de la semoule sur la qualité du couscous artisanal. *Mémoire d'Ingénieur*, Ina, El Harrach, Algérie, 65p.

TORBICA A., HADNADEY M. et HADNADEY T. D., 2011. Possibility of using durum wheat flour as an improvement agent in bread making process. *Procedia Food Science*, n. 1, pp. 1628 – 1632.

TRENTESAUX E., 1995. Evaluation de la qualité du blé dur. *CIHEAM. Options méditerranéennes*. pp. 53-59.

TROCCOLI A., BORRELLI G. M. , DE-VITA P., FARES C. et DI-FONZOET N., 2000. Mini review: durum wheat quality : a multidisciplinary concept. *Journal of Cereal Science*, n. 32, pp. 99-113.

TURNBULL K., 2001. Quality assurance in a dry pasta factory. In: *KILL R. C. et TURNBULL K. Pasta and semoulina technology*, pp. 181-221.

UTHAYAKUMARAN S., LAFIANDRA D. et GIANIBELLI M. C., 2004. Evaluation of durum wheat quality using micro-scale and basic rheological tests. In: *LAFIANDRA D. MASCI S. et D'OVIDIO R. Gluten proteins*, pp. 275-278.

UTHAYAKUMARAN S., GRAS P. W., STODDARD F. L., et BEKES F., 1999. Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ratio on the functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, n. 76, pp. 389-394.

VERBRUGGEN I. M., VERAVERBEKE W. S., VANDAMME A. et DELCOUR J. A., 1998. Simultaneous isolation of wheat high molecular weight and low molecular weight glutenin subunits. *Journal of Cereal Science*, vol. 28, pp. 25-32.

VIERLING. E., 2008. Les céréales. Aliments et boissons, Filières et produits. Sciences des aliments. 3^{ème} édition. Ed. SCEREN, p. 159-175.

WALLE M. et TRENTESAUX E. ,1980. Studio di un metodo pratico con l'alveografo di Chopin per la valutazione dell'attitudine dei grani duri e delle semole a produrre pasta alimentare. *Tecnica Molitaria*, n. 12, pp. 917-922.

WANG C. et KOVACS M. I. P., 2002a. Swelling index of glutenin test. I. Method and comparison with sedimentation, gel-protein, and insoluble glutenin tests. *Cereal Chemistry*, vol.79, n. 2, p.p. 183-189.

WANG C. et KOVACS M. I. P., 2002b. Swelling index of glutenin test. II. Application in prediction of dough properties and end use quality. *Cereal Chemistry*, vol.79, n.2, p.p. 190-19.

WANG C. et KOVACS M. I. P., 2002c. Swelling Index og glutenin for prediction of durum wheat quality. *Cereal Chemistry*, vol. 79, n. 2 pp.183-189.

WANG Y. G., KHAN K., HARELAND G. et NYGARD G., 2007. Distribution of protein composition in bread wheat flour mill streams and relationship to bread making quality. *Cereal Chemistry*, vol. 84, n. 3, pp. 271-275.

WASIK R. J. et BUSHUK W., 1975. Relation between molecular-weight-distribution of endosperm proteins and spaghetti making quality. *Cereal Chemistry*, n. 52, pp. 322-328.

WIESER H., SEILMEIER W., et BELITZ H. D., 1994. Quantitative determination of gliadin subgroups from different wheat cultivars *Journal of Cereal Science*,n. 19, pp. 149-155.

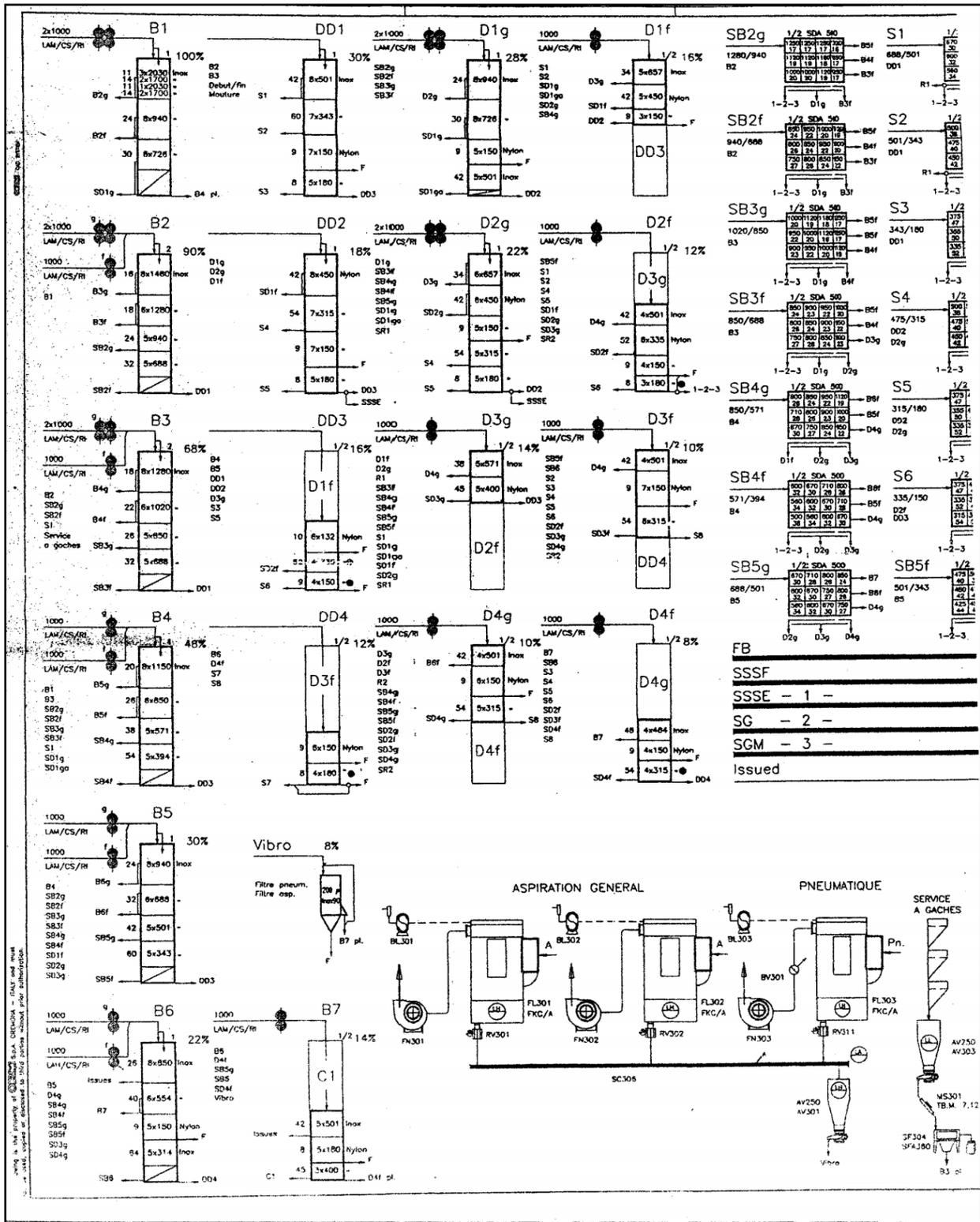
WILLIAMS P., ELHARAMEIN F. J., NAKKOU H. et RIHAVI S., 1988. Crop quality evaluation methods and guidelines. International centre for agricultural research in the dry areas (ICARDA), Aleppo.

WILLM Cl. et FOURRE N., 1998. La gestion des cendres en meunerie. *Industries des Céréales*. n. 108,pp. 15-20.

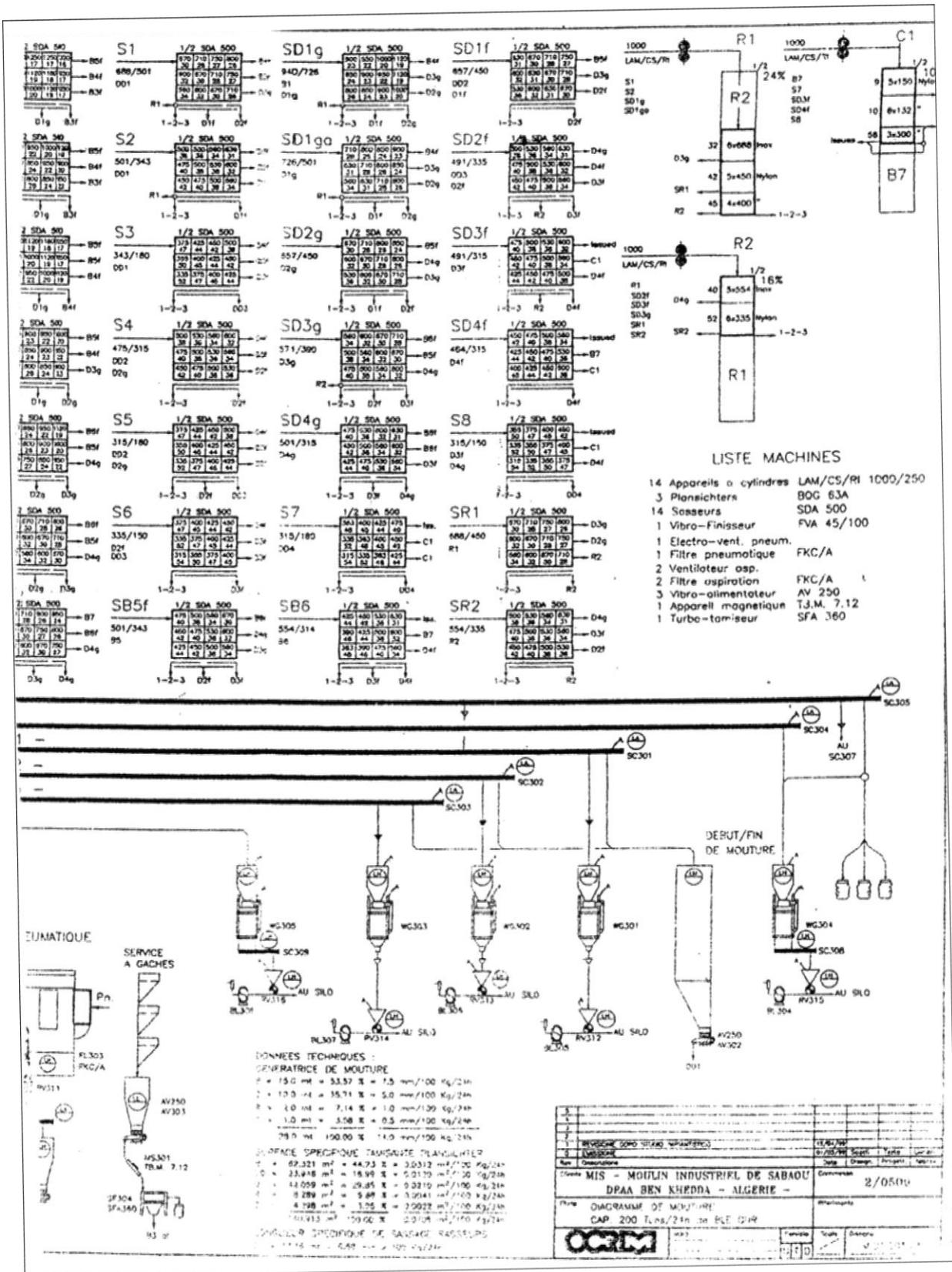
WRIGLEY C., BEKES F. et BUSHUK W., 2006. Gliadin and Glutenin: The Unique Balance of Wheat Quality (1st Edn), AACC International, MN, pp. 3-32.

YOYOU S., 2012. Contribution à une meilleure connaissance de la fraction gluténine et de ses relations avec les caractéristiques technologiques des farines de blés tendres algériens. Thèse de Magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Alger. 94p.

Annexe 1 : Diagramme de mouture du blé dur appliqué au complexe de « MIS ».



Annexe 1 (suite).



Annexe 2 : Critères de classification des paramètres physico-chimiques et technologiques.

1 / Echelles de classement des échantillons selon les indices de colorations HOULIAROPOULOS (1981):

- Indice de jaune (b)
 - élevé > 35
 - moyen 28-35
 - faible < 28
- Indice de brun (100-L)
 - élevé > 21
 - moyen 18-21
 - faible < 18

2 / Classement de la force du gluten en fonction du gluten index (GIx) selon CUBADDA et CARCEA (1994).

GIx > 80 : gluten excellent.

GIx 35-65 : gluten moyen.

GIx ≤ 20 : gluten faible.

3 / Classement de l'activité alpha-amylasique pour la panification (BARD, 1997):

-Indice < 180 sec : activité hyper-diastasiq (activité amylasique élevée), farine impropre à la panification (pâte collante, pain se déchire et manque de tenue et une croûte fortement colorée).

-Indice > 300 : activité hypo-diastasiq, correction nécessaire par addition d'amylase (fermentation lente, mie sèche, volume du pain faible et une croûte pâle).

-Indice entre 180 et 300 : activité moyenne avec un optimum = 260 (blé non germé, mie correcte).

Annexe 3 : Masse de la prise d'essai en fonction de la teneur en eau de l'échantillon pour le farinographe.

| Teneur en eau (%) | Pour une masse nominale de 7g à 15% de teneur en eau | Teneur en eau (%) | Pour une masse nominale de 7g à 15% de teneur en eau |
|-------------------|--|-------------------|--|
| 9,0 | 6,40 | 13,6 | 6,85 |
| 9,2 | 6,45 | 13,8 | 6,90 |
| 9,4 | 6,45 | 14,0 | 6,90 |
| 9,6 | 6,45 | 14,2 | 6,90 |
| 9,8 | 6,50 | 14,4 | 6,95 |
| 10,0 | 6,50 | 14,6 | 6,95 |
| 10,2 | 6,55 | 14,8 | 7,00 |
| 10,4 | 6,55 | 15,0 | 7,00 |
| 10,6 | 6,55 | 15,2 | 7,00 |
| 10,8 | 6,60 | 15,4 | 7,05 |
| 11,0 | 6,60 | 15,6 | 7,05 |
| 11,2 | 6,60 | 15,8 | 7,10 |
| 11,4 | 6,65 | 16,0 | 7,10 |
| 11,6 | 6,65 | 16,2 | 7,15 |
| 11,8 | 6,70 | 16,4 | 7,15 |
| 12,0 | 6,70 | 16,6 | 7,15 |
| 12,2 | 6,70 | 16,8 | 7,20 |
| 12,4 | 6,75 | 17,0 | 7,20 |
| 12,6 | 6,75 | 17,2 | 7,25 |
| 12,8 | 6,80 | 17,4 | 7,25 |
| 13,0 | 6,80 | 17,6 | 7,30 |
| 13,2 | 6,80 | 17,8 | 7,30 |
| 13,4 | 6,85 | 18,0 | 7,30 |

(NF. 03-703, ISO 3093, 2004)

Annexe 4 : Table de correspondance de la quantité d'eau à ajouter en fonction de la teneur en protéines pour le mixographe, Université américaine du Nord DACOSTA : station d'agriculture (Département de technologie des céréales, 1987).

| Teneur en protéines (%) | Quantité d'eau à ajouter (ml) |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 16,0 | 6,60 |
| 15,5 | 6,55 |
| 15,0 | 6,50 |
| 14,5 | 6,45 |
| 14,0 | 6,40 |
| 13,5 | 6,35 |
| 13,0 | 6,30 |
| 12,9 | 6,29 |
| 12,8 | 6,28 |
| 12,7 | 6,27 |
| 12,6 | 6,26 |
| 12,5 | 6,25 |
| 12,4 | 6,24 |
| 12,3 | 6,23 |
| 12,2 | 6,22 |
| 12,1 | 6,21 |
| 12,0 | 6,20 |
| 11,9 | 6,19 |
| 11,8 | 6,18 |
| 11,7 | 6,17 |
| 11,6 | 6,16 |
| 11,5 | 6,15 |
| 11,4 | 6,14 |
| 11,3 | 6,13 |
| 11,2 | 6,12 |
| 11,1 | 6,11 |
| 11,0 | 6,10 |
| 10,9 | 6,09 |
| 10,8 | 6,08 |
| 10,7 | 6,07 |
| 10,6 | 6,06 |
| 10,5 | 6,05 |
| 10,4 | 6,04 |
| 10,3 | 6,03 |
| 10,2 | 6,02 |
| 10,1 | 6,01 |
| 10,0 | 6,00 |

Annexe 5 : Interprétation des analyses rhéologiques

1/ Classement des blés en fonction des paramètres du mixogramme.

| Temps du développement de la pâte en minutes | Hauteur de la courbe au pic maximum (%) | Affaiblissement (tolérance au pétrissage) (%) | Force |
|---|--|--|--------------------|
| 4,5 – 6 | ≥70 | 0 – 5 | Très bonne |
| 3,4 – 4,4 | 60 – 69 | 5 – 10 | Bonne |
| 2,5 – 3,3 | 50 – 59 | 10 – 25 | Moyenne |
| 1,5 – 2,4 | 40 – 49 | 25 – 40 | Faible |
| 0 – 1,4 | < 40 | > 40 | Très faible |

WILLIAMS *et al.* (1988).

2 / Valeurs caractéristiques moyennes des paramètres alvéographiques pour la panification.

| Types de blé/paramètres | W | G | P/L |
|--------------------------------|----------|----------|---------------|
| Blé type boulangerie | 130-180 | 20-23 | 0.45-0.65 |
| Blé améliorant | 180-250 | | 0.45-0.65 |
| Blé de force | > 250 | | |
| Blé impanifiable | < 130 | | |
| Blé panifiable courant | 130-250 | | Non équilibré |

(Norme I.S.O. 5530/04)

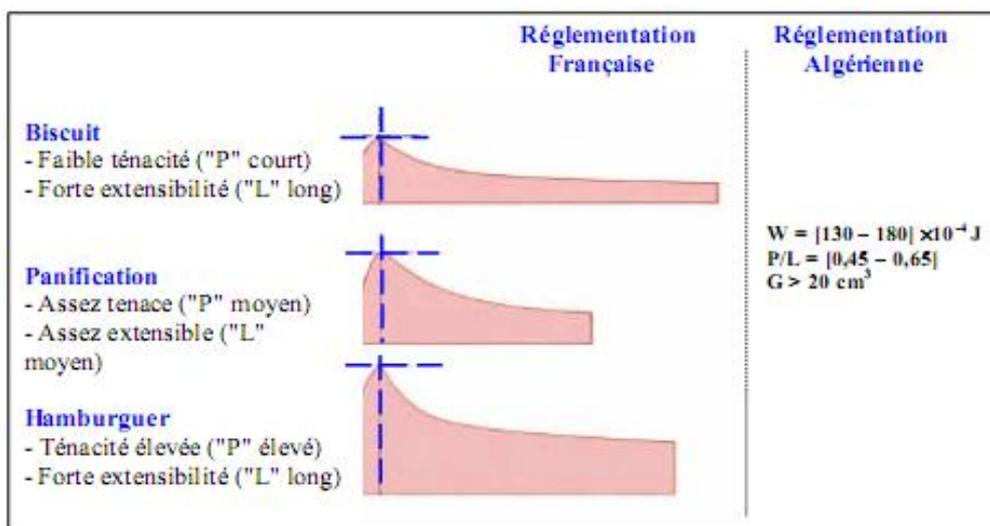
Annexe 5 (suite)

3/ Analyse des paramètres farinographiques en fonction d'une utilisation en panification française (sans présence de produits d'addition).

| Appréciation | Hydratation (%) | Stabilité (min) | Affaiblissement (UB ou UF) |
|--------------|-----------------|-----------------|----------------------------|
| Insuffisant | < 50 | < 2 | >100 |
| moyen | 50-55 | 2-4 | 50-100 |
| Bon | 55-60 | 4-10 | 20-50 |
| Très bon | > 60 | > 10 | < 20 |

BERLAND et ROUSSEL, (2005).

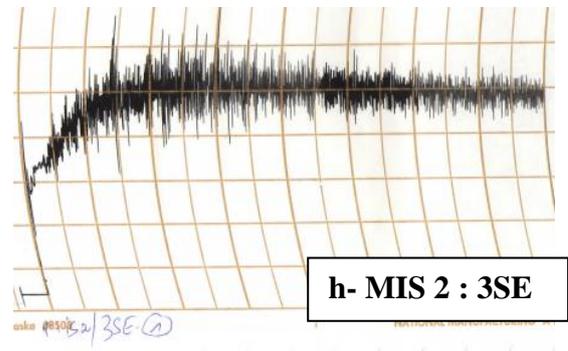
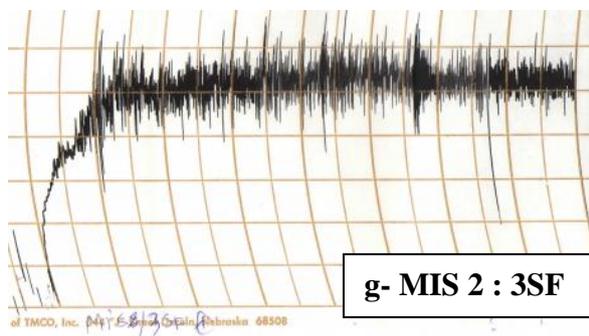
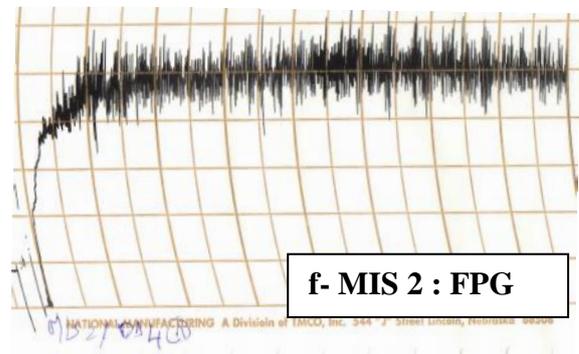
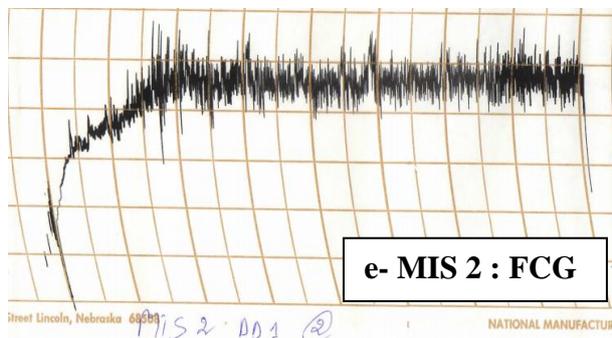
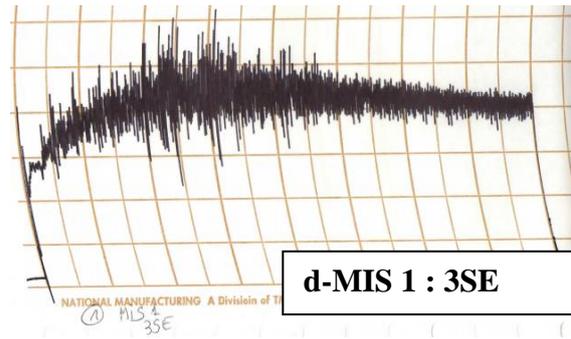
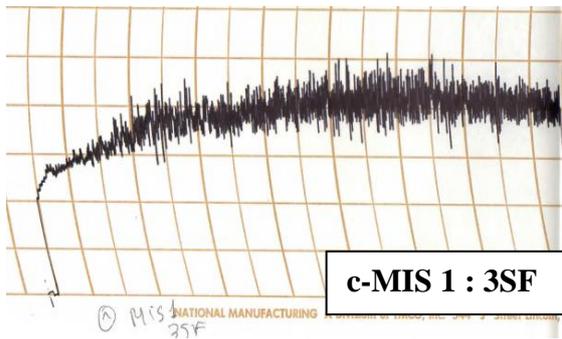
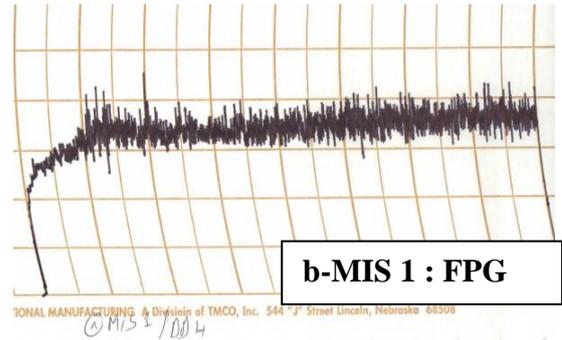
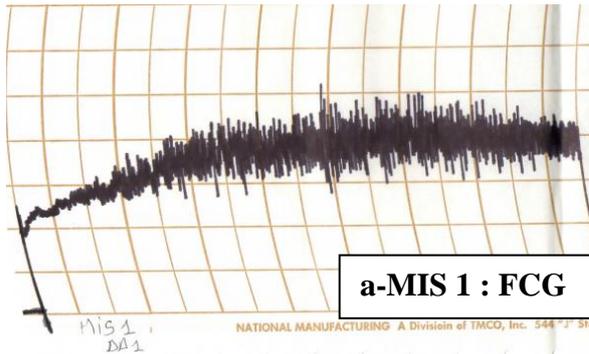
4/ Interprétation des résultats de l'Alvéographe Chopin selon les réglementations Française (GUINET et GODON 1994) et Algérienne (J.O.R.A. 1991).



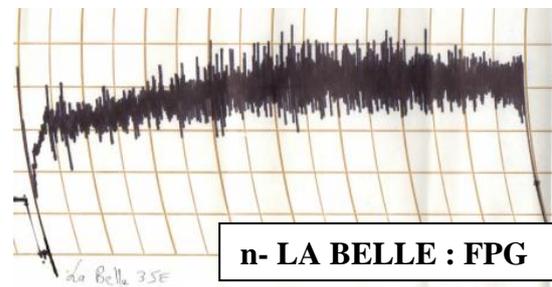
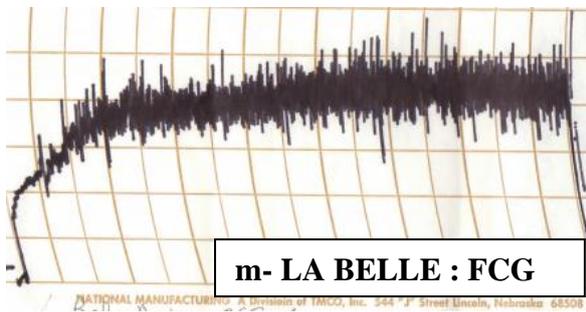
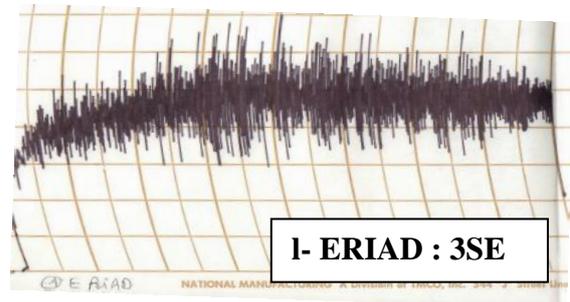
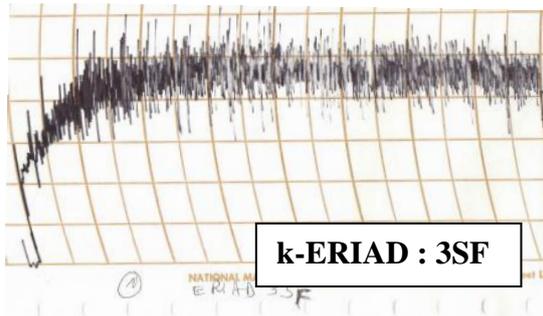
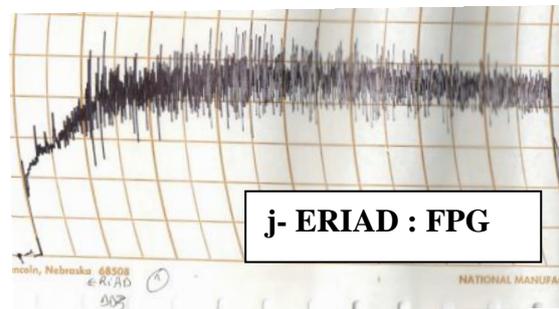
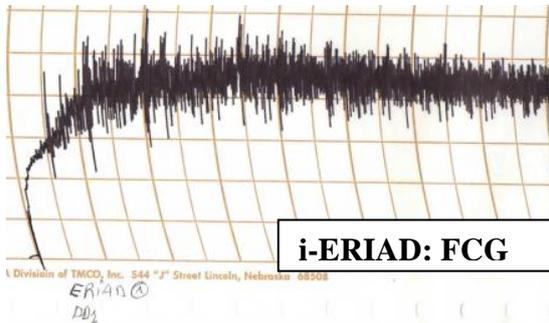
Annexe 6 : Teneur en protéines des différentes fractions de mouture de blé dur (%MS).

| | Fractions | PT | PM | GS | GI | | | RI.final | GT | Pr.POL |
|-----------------|-------------------|-------|------|------|--------|--------|----------|----------|------|--------|
| | | | | | SG-HPM | SG-FPM | TOTAL GI | | | |
| MIS 1 | FCG (DD1) | 10,38 | 5,04 | 1,55 | 0,31 | 1,67 | 1,98 | 1,18 | 3,53 | 4,71 |
| | FPG (DD4) | 13,21 | 7,7 | 1,84 | 0,5 | 1,67 | 2,17 | 2,04 | 4,02 | 6,06 |
| | 3SF | 10,79 | 6,25 | 1,25 | 0,41 | 1,67 | 2,08 | 1,32 | 3,33 | 4,65 |
| | 3SE | 11,2 | 5,35 | 1,47 | 0,41 | 2,25 | 2,66 | 1,27 | 4,13 | 5,40 |
| MIS 2 | FCG (DD1) | 10,40 | 5,16 | 1,78 | 0,38 | 1,82 | 2,2 | 1,33 | 3,98 | 5,31 |
| | FPG (DD4) | 13,88 | 7,64 | 2,15 | 0,49 | 2,17 | 2,66 | 2,16 | 4,81 | 6,97 |
| | 3SF | 12,09 | 6,18 | 1,66 | 0,41 | 2,18 | 2,59 | 1,63 | 4,26 | 5,89 |
| | 3SE | 10,91 | 5,26 | 1,63 | 0,39 | 2,31 | 2,70 | 1,25 | 4,34 | 5,59 |
| ERIAS | FCG (DD1) | 13,25 | 6,91 | 1,55 | 0,65 | 2,42 | 3,07 | 1,99 | 4,63 | 6,62 |
| | FPG (DD3) | 14,08 | 7,67 | 1,73 | 0,65 | 2,34 | 2,99 | 2,17 | 4,73 | 6,90 |
| | 3SF | 13,89 | 7,13 | 1,88 | 0,57 | 2,21 | 2,78 | 2,08 | 4,66 | 6,74 |
| | 3SE | 14,77 | 6,33 | 2,14 | 0,6 | 3,82 | 4,42 | 2,12 | 6,57 | 8,69 |
| LA BELLE | 3SF | 13,57 | 6,45 | 1,97 | 0,48 | 3,16 | 3,64 | 1,34 | 5,61 | 6,95 |
| | 3SE | 13,21 | 5,77 | 1,96 | 0,53 | 2,72 | 3,25 | 1,63 | 5,21 | 6,84 |
| | Moyennes /farines | 12,79 | 6,61 | 1,73 | 0,48 | 2,13 | 2,61 | 1,72 | 4,35 | 6,08 |
| | Ecart-type | 1,38 | 0,97 | 0,25 | 0,11 | 0,46 | 0,52 | 0,40 | 0,67 | 0,91 |
| | Moyenne/semoule | 12,52 | 5,67 | 1,8 | 0,48 | 2,77 | 3,25 | 1,56 | 5,06 | 6,63 |
| | Ecart-type | 1,81 | 0,48 | 0,30 | 0,09 | 0,72 | 0,82 | 0,40 | 1,10 | 1,14 |

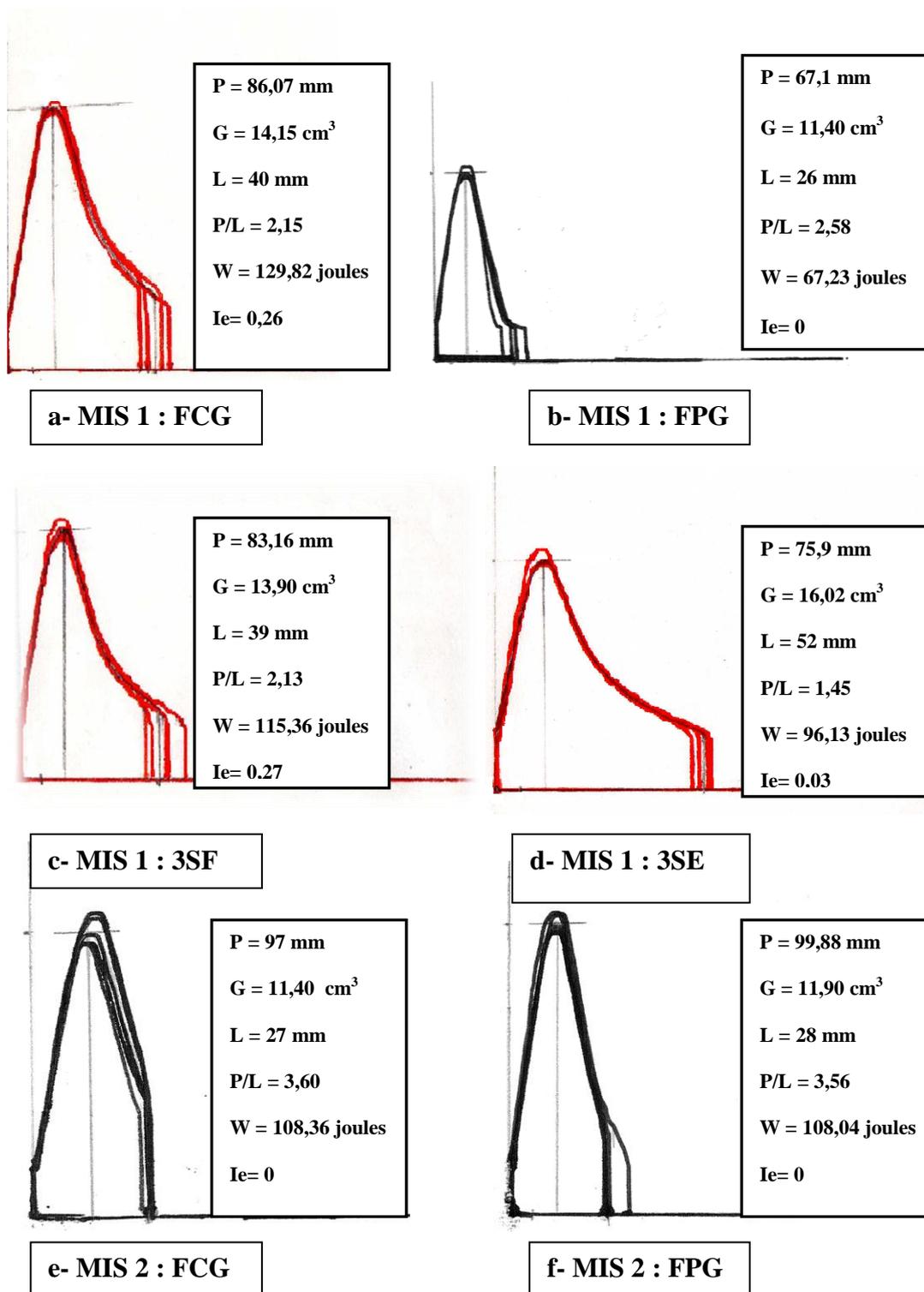
Annexe 7 : Mixogrammes des fractions de mouture du blé dur.



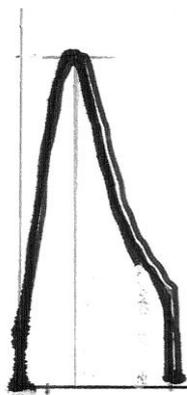
Annexe 7 (suite)



Annexe 8 : Alvéogrammes des fractions de mouture de blé dur.

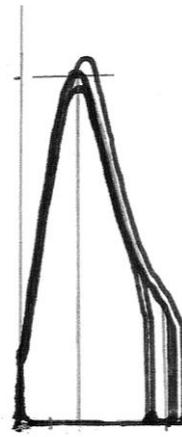


Annexe 8 (suite)



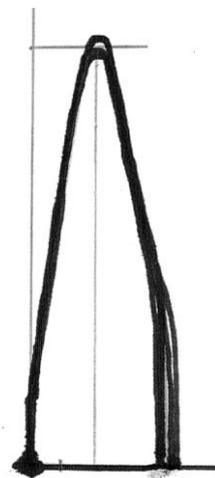
$P = 92,95 \text{ mm}$
 $G = 12,57 \text{ cm}^3$
 $L = 32 \text{ mm}$
 $P/L = 2,90$
 $W = 110,78 \text{ joules}$
 $I_e = 0$

g- MIS 2 : 3SF



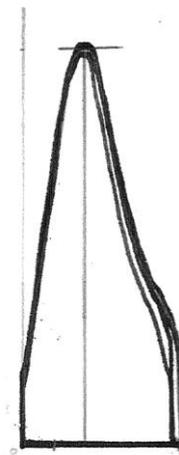
$P = 99,66 \text{ mm}$
 $G = 12,74 \text{ cm}^3$
 $L = 33 \text{ mm}$
 $P/L = 2,95$
 $W = 135,21 \text{ joules}$
 $I_e = 0$

h- MIS 2 : 3SE



$P = 109,34 \text{ mm}$
 $G = 11,70 \text{ cm}^3$
 $L = 28 \text{ mm}$
 $P/L = 3,90$
 $W = 126,22 \text{ joules}$
 $I_e = 0$

i- ERIAD: FCG



$P = 106,03 \text{ mm}$
 $G = 13,22 \text{ cm}^3$
 $L = 35 \text{ mm}$
 $P/L = 3,02$
 $W = 142,04 \text{ joules}$
 $I_e = 0$

j- ERIAD : FPG



$P = 116,38 \text{ mm}$
 $G = 12,96 \text{ cm}^3$
 $L = 34 \text{ mm}$
 $P/L = 3,42$
 $W = 154,27 \text{ joules}$
 $I_e = 0,28$

k- ERIAD: 3SF



$P = 138,87 \text{ mm}$
 $G = 15,35 \text{ cm}^3$
 $L = 47,5 \text{ mm}$
 $P/L = 2,92$
 $W = 245,83 \text{ joules}$
 $I_e = 0,41$

l- ERIAD: 3SE

Annexe 8 (suite)



$P = 151,8 \text{ mm}$
 $G = 13,05 \text{ cm}^3$
 $L = 34,5 \text{ mm}$
 $P/L = 4,4$
 $W = 229,35 \text{ joules}$
 $I_e = 0$

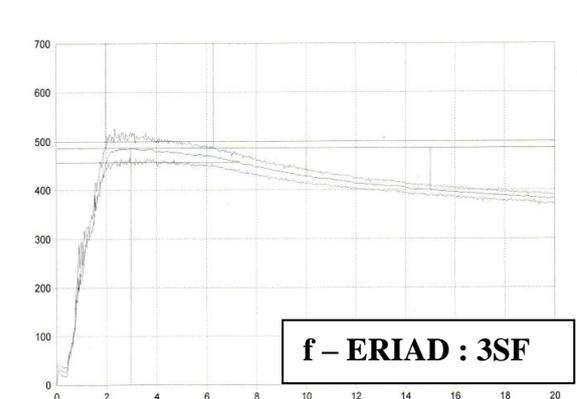
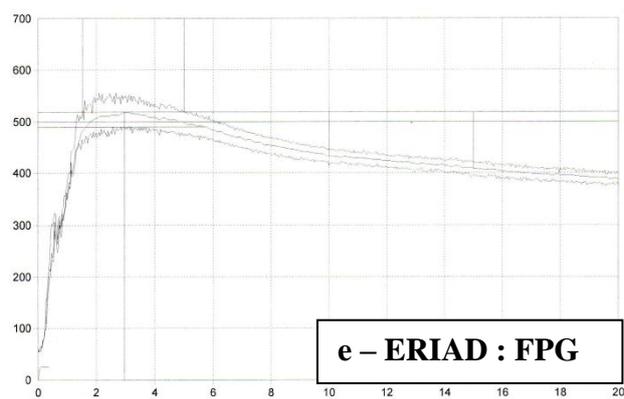
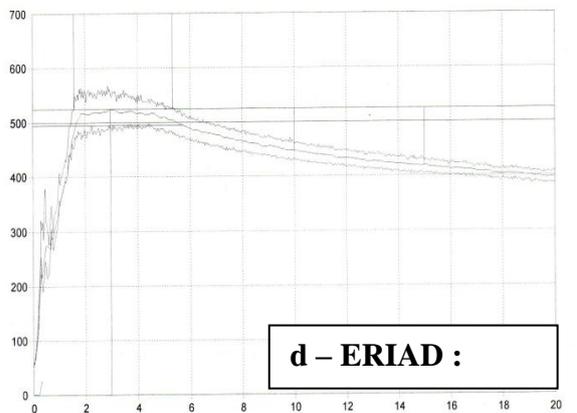
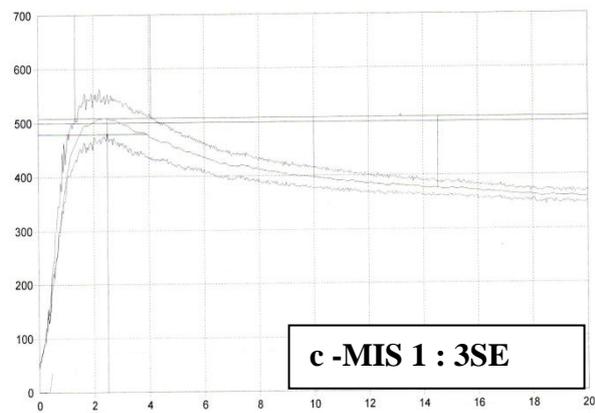
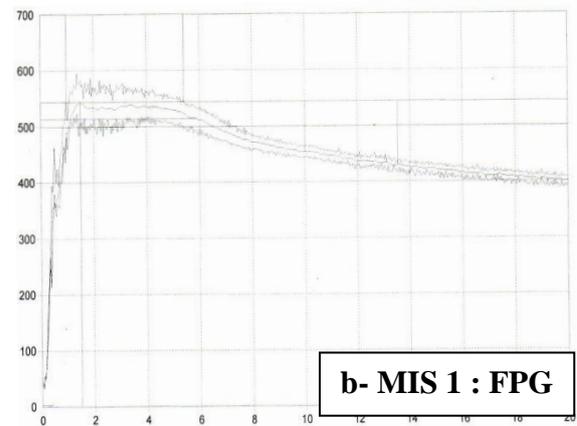
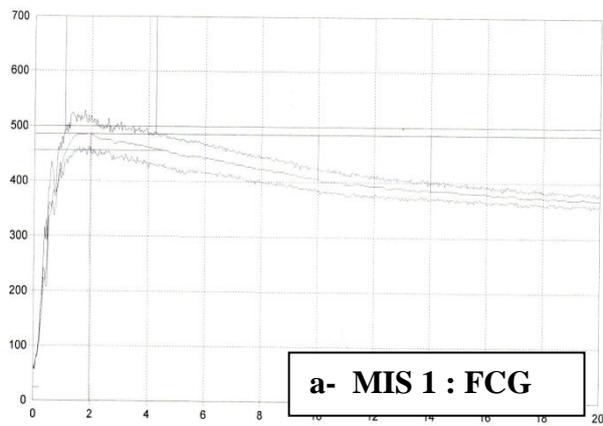
m- LA BELLE : 3SF



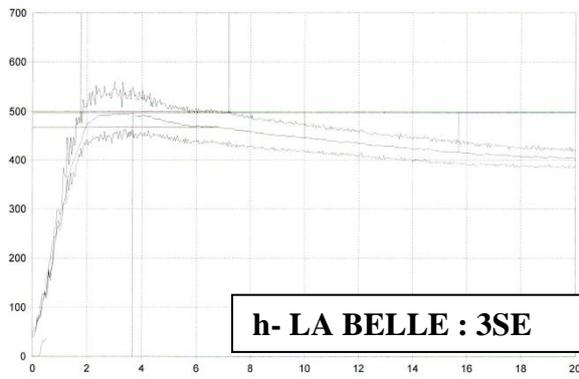
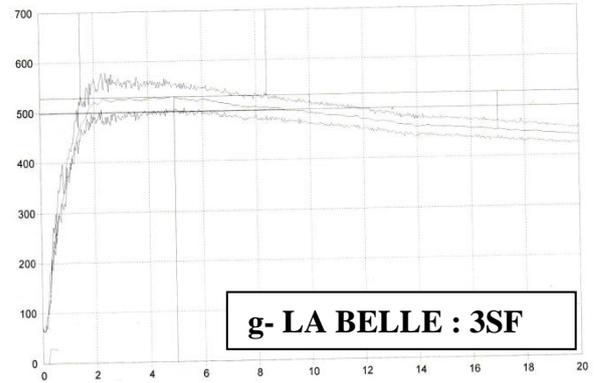
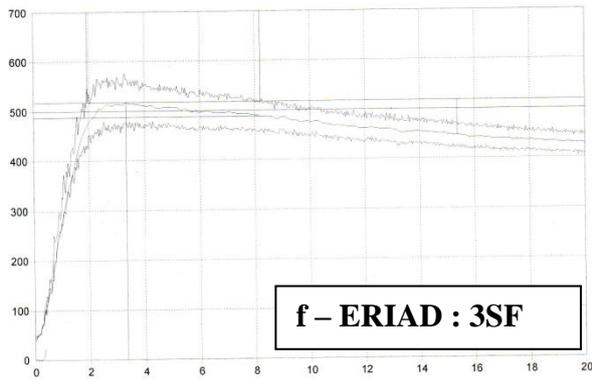
$P = 142,65 \text{ mm}$
 $G = 12,64 \text{ cm}^3$
 $L = 33 \text{ mm}$
 $P/L = 4,32$
 $W = 147,34 \text{ joules}$
 $I_e = 0$

n- LA BELLE : 3SE

Annexe 9 : Farinogrammes des fractions de mouture du blé dur.



Annexe 9 (suite)



Annexe 10 : Evolution des rendements et des importations en blé dur durant la période 2010-2012.

| Années | Rendements (qx/ha) | Importations (T) | Importations (\$) |
|---------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 2010 | 15 | 1 235 310 | 334 409 000 |
| 2011 | 17 | 1 851 499 | 858 170 000 |
| 2012 | 18 | 1 579 757 | 654 818 000 |

(M.A.D.R)

Résumé

L'objectif de cette étude est de déterminer les caractéristiques physico-chimiques et biochimiques (teneurs en protéines et leurs fractions) de quelques produits de mouture de blés durs algériens : semoule commerciale, farine centrale (FCG), farine périphérique (FPG) et farine entière (3SF) ainsi que leurs relations avec quelques aspects de la qualité boulangère appréciés par des tests technologiques.

Les résultats révèlent que les teneurs en protéines, en gluten et en cendres augmentent au fur à mesure du rapprochement de la périphérie du grain.

Les teneurs en gluténines insolubles et les gluténines totales sont plus élevées dans le cas des semoules, et diminuent avec l'avancement de la mouture dans le cas des farines.

L'analyse technologique des échantillons par le biais de l'alvéographe Chopin montre que les fractions de mouture présentent des alvéogrammes déséquilibrés en faveur des grandes ténacités. Les paramètres mixographiques et farinographiques montrent que les fractions (3SF) et (3SE) présentent les temps de développement les plus longs, les meilleures stabilités et une bonne résistance au pétrissage.

Ces résultats font ressortir que les échantillons étudiés semblent inappropriés à la panification en l'état. Toutefois, les farines «3SF» et les semoules présentent relativement les meilleures aptitudes technologiques.

L'analyse statistique des résultats a montré que les teneurs en protéines des sous-unités de gluténines FPM insolubles, les teneurs en gluténines insolubles, les gluténines totales, les teneurs en protéines polymériques et le ratio SG-FPM/SG-HPM insolubles sont associés positivement aux paramètres de la force de la pâte (ténacité P et force W) et aux teneurs en gluten humide et gluten sec. Aussi, les SG-FPM et gluténines insolubles et totales (% MS) sont associées positivement et significativement au temps de développement de la pâte et à la stabilité, et négativement corrélées à l'affaiblissement (AFF2) mesurés au farinographe. Inversement, les protéines monomériques et le rapport protéines monomériques /protéines polymériques sont reliés négativement à la force (W) et le gluten index.

Ces résultats suggèrent qu'il existe des différences dans la composition protéique des fractions de mouture de blé dur. Les gluténines insolubles et les SG-FPM Insolubles correspondent à la force du gluten et les protéines monomériques déterminent la faiblesse du gluten.

Mots clés : blé dur - produits de mouture – farine – semoule – caractéristiques technologiques - composition protéiques - rhéologie.

Abstract

The aim of this study is to determine the physico-chemical and biochemical characteristics (protein and their fractions) of some milling products of Algerian durum wheat: Commercial semolina, center flour (FCG), peripheral flour (FPG) and whole flour (3SF), then, their relationship with some aspects of breadmaking quality appreciated by technological tests.

The results show that the proteins, gluten and ash content increase gradually as the merger of the periphery of the grain.

Levels of insoluble glutenin and total glutenin are higher in the case of semolina and decrease with the advancement of milling in the case of flour.

Technological analysis of samples through alveograph Chopin showed that the milling fractions have alvéogrammes unbalanced in favor of large toughness. The farinograph and mixograph show that fractions (3SF) and (3SE) have the longest development time, the best stabilities and good resistance to mixing.

These results indicate that the samples studied seem inappropriate for bread in the state. However, flours "3SF" and semolina have relatively the best technological skills

Statistical analysis of the results have shown that the protein contents of insoluble LMW glutenin subunits, concentrations of insoluble glutenin, total glutenin, the contents of polymeric protein and the ratio of GS-LMW to GS-HPM insolubles are associated positively with dough strength parameters (strength W and tenacity P), wet gluten content and dry gluten. Also, the insoluble LMW glutenin and total insoluble glutenin (% DM) are associated positively and significantly with development time and stability, and negatively correlated with farinograph degree of softening (AFF2). Conversely, monomeric protein and the ratio monomeric proteins to polymeric proteins is negatively related to the strength (W) and gluten index.

These results suggest that there are differences in the protein composition of the milling fractions of durum wheat. Insoluble glutenin and insoluble LMW glutenin determine gluten strength and monomeric proteins determine the weak gluten.

Key words: durum - milled products - flour - semolina – technology characteristics-protein compositions - rheology.

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد الخصائص الفيزيوكيميائية والبيوكيميائية (البروتينات وجزئياتها) لبعض العينات الناتجة عن طحن القمح الصلب الجزائري المتماثلة في السميد، الأجزاء الطرفية، الأجزاء المركزية، الأجزاء الكلية و علاقاتها مع بعض خصائص قوة العجين من خلال تحاليل تكنولوجية.

تظهر النتائج أن كمية البروتينات، الغلوتين والرماد تزداد تدريجيا كلما اقتربنا من اطراف حبوب القمح الصلب.

اما كمية الغلوتينات الغير قابلة للذوبان و الغلوتينات الكلية، فهي مرتفعة في حالة السميد و تنقص تدريجيا مع التقدم في مراحل الطحن.

اظهرت التحاليل التكنولوجية من خلال جهاز الالفيوغراف، ان مكونات طحن القمح الصلب الجزائري ذو صلابة عالية. الميكسوغراف و الفارينوغراف يدلان على ان العينات الناتجة عن الطحن المتمثلة في الأجزاء الكلية و السميد لها مدة عجين طويلة مع خصائص استقرار و مقاومة اعلى من العينات الأخرى.

تدل النتائج على ان العينات المدروسة ير ملائمة للخبز مباشرة، و ان عينات اجزاء الطحين الكلية و السميد تملك الخصائص التكنولوجية الأفضل.

تكشف التحاليل الاحصائية ان كمية جزيئات الغلوتين الغير قابلة للذوبان ذو الوزن المنخفض، الغلوتينات الغير قابلة للذوبان، الغلوتينات الكلية، البروتينات المعقدة و النسبة: تحت وحدات الغلوتينية ذات الوزن المنخفض/تحت وحدات الغلوتينية ذات الوزن المرتفع الغير قابلة للذوبان مرتبطة ايجابيا مع خصائص قوة العجين، وكمية الغلوتين الرطب و الجاف.

كذلك ترتبط تحت وحدات الغلوتينية ذات الوزن المنخفض الغير قابلة للذوبان و الغلوتين الكلي بشكل ايجابي مع مدة و استقرارية العجين، و بشكل سلبي مع انخفاض العجين. على عكس نسبة البروتينات الغير معقدة (البروتينات المعقدة) التي ترتبط سلبيا مع خصائص قوة الغلوتين. العجين و قوة

هذه النتائج تدل على وجود اختلاف في المكونات البروتينية للعينات الناتجة عن طحن القمح الصلب. الغلوتين غير قابل للذوبان و تحت وحدات اجزاء الغلوتين غير قابلة للذوبان ذات الوزن المنخفض تتكافؤ مع قوة الغلوتين على عكس البروتينات المعقدة.

الكلمات المفتاحية: القمح الصلب – منتجات الطحن- طحين- سميد- الخصائص التكنولوجية- المكونات البروتينية – الريولوجيا.