REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE

INSTITUT DE LA NUTRITION, DE L'ALIMENTATION ET DES TECHNOLOGIES AGRO-ALIMENTAIRES
I.N.A.T.A-A.

N° d'ordre :
N° de série :

Thèse

en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en Sciences

Spécialité : Sciences Alimentaires

Couscous et pain sans gluten pour malades cœliaques : aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs

---

par : **Leila BENATALLAH - BENCHIKH EL FEGGOUN**

présentée le 25 avril 2009

Jury composé de :

Président :	A. AGLI	Professeur (I.N.A.T.A-A.- Constantine)
Rapporteur :	M. N. ZIDOUNE	Professeur (I.N.A.T.A-A.- Constantine)
Co-rapporteur :	C. MICHON	Professeur (AgroParis-Tech - Paris)
Examinateurs :	A. K. ALLAF	Professeur (Université de la Rochelle)
	M. M. BELLAL	Professeur (I.N.A. – Alger)
	H. NAMOUNE	Professeur (I.N.A.T.A-A.- Constantine)

Au terme de ce travail, je tiens à remercier mon enseignant et Directeur de thèse, Monsieur Mohammed Nasreddine ZIDOUNE, Professeur à l'université de Constantine et Chef de l'équipe Transformation et Elaboration des Produits Agro-alimentaires (T.E.P.A.) du Laboratoire de Recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.), pour m'avoir proposé ce sujet sur la fabrication d'aliments sans gluten pour coeliaques et pour m'avoir dirigée tout au long de la réalisation de ce travail, pour son esprit scientifique, ses précieux conseils et ses encouragements.

C'est avec un grand honneur et un grand plaisir que je remercie Monsieur le Professeur Launay Bernard qui m'a ouvert les portes du Laboratoire de Biophysique des Matériaux Alimentaires (L.B.M.A.) d'AgroParis Tech – Massy (France), et m'a fait profiter de ses précieux conseils.

Je tiens également à témoigner ma profonde gratitude à Madame Camille MICHON, Professeur au sein du L.B.M.A., pour son accueil, sa gentillesse, son intéressement à mon sujet de thèse, sa participation aux différentes caractérisations rhéologiques et ses précieuses et clairvoyantes orientations.

J'exprime mes vifs remerciements à mon enseignant de l'I.N.A.T.A-A., Monsieur Abdel Nacer AGLI, Professeur et Chef du L.N.T.A. à Constantine, pour son intéressement ininterrompu à mon travail, ses conseils techniques enrichissants et ses encouragements et enfin pour son acceptation de présider le jury de cette thèse.

Que Monsieur le Professeur Abdul Karim ALLAF, Directeur du Laboratoire Maîtrise des Technologies Agro-industrielles (LMTAI) de l'Université La Rochelle – France, trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour son amabilité d'avoir accepté, malgré ses nombreuses occupations, de se rendre à Constantine afin de nous honorer à l'I.N.A.T.A-A et faire partie du jury d'évaluation de cette thèse.

Mes sincères remerciements vont à Monsieur le Professeur Mohand Mouloud BELLAL, du Département de Technologie Alimentaire de l'Institut National Agronomique d'El-Harrach pour avoir accepté d'évaluer mon travail et de m'honorer par sa participation au jury de cette thèse.

Je remercie vivement mon enseignant de l'I.N.A.T.A-A., Monsieur Hacène NAMOUNE, Professeur et Chef d'équipe au sein du L.N.T.A., pour son acceptation de juger mon travail et de me faire l'honneur de siéger au sein du jury de cette thèse.

Je n'oublie pas de remercier Monsieur Gérard CUVELIER , Professeur au sein du L.B.M.A., pour son accueil et son intéressement de près à cette recherche.

Je tiens à remercier vivement Monsieur Abdelghani BOUDJELLAL, Directeur de l'I.N.A.T.A-A., pour son appui et ses encouragements.

Mes remerciements vont aussi Monsieur le Directeur de l'I.T.G.C. et son équipe de Guelma pour la fourniture des échantillons de légumes secs qui ont servi à la réalisation de cette thèse.

Merci à mes amis du L.B.M.A. qui ont été une deuxième famille pour moi en France : Vatusua, Brigitte, Anne Marie, Sandra, Sylvie, Djennette, Imène, Clémence, Nedjla, Perla, Alexandra, Samir et Pablo.

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'avancement de ma thèse, et à tous les amis, collègues, magisters et doctorants, ainsi que les personnels administratif et technique de l'I.N.A.T.A-A., pour la dimension humaine inestimable qu'ils ont manifestée à mon égard. A Hayet, Hamida, Ouarda, Ferial, Fettou, Nora, Lynda, Amani, Halima, Faïza, Nouhed, Soulef,…

Je dédie cette thèse :

A la mémoire de mon Père

A ma Mère
Pour tous ses sacrifices,
ses encouragements et à qui,
cette thèse revient en premier.

A mon Mari
Pour son aide et
ses encouragements.

A Wassim,
Rym et Wael
Pour le sucre apporté
aux moments de détente
et la stimulation à ma persévérance.

A ma sœur Naouel
A son mari Fethi
Ils me sont très chers.

SOMMAIRE GLOBAL

Liste des abréviations 1

Introduction Générale 2

Partie 1. MALADIE CŒLIAQUE ET REGIME SANS GLUTEN EN ALGERIE..... 5

Partie 2. FORMULATION SANS GLUTEN PROPOSEES..... 26

Partie 3. APTITUDE A LA FABRICATION DE COUSCOUS SANS GLUTEN..... 53

Partie 4. COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DE PATES : APTITUDES A LA PANIFICATION DE LA FORMULE RIZ-FEVEROLE..... 83

Conclusion générale & Perspectives..... 162

Annexes..... 164

LISTE DES ABREVIATIONS

PMI : Centre de Protection Maternelle et Infantile
UDS : Unité de Dépistage et de Suivi
PMC : Prévalence de la Maladie Cœliaque
DDS : Direction De la Santé
IMC : Indice de Masse Corporelle
RGS : Régime Sans Gluten
MCBL : Microscopie Confocale à Balayage Laser
λ_{exc} : Longueur d'onde d'excitation
λ_{exc} : Longueur d'onde d'émission
ACP : Analyse en Composantes Principales
SR : Semoule de Riz
SF : Semoule de Pois Chiche
SPP : Semoule de Pois Protéagineux
FR : Farine de Riz
FF : Farine de Fèverole
FC : Farine de pois Chiche
FPP : Farine de Pois Protéagineux
FRF : Formule Riz-Fèverole
FRC : Formule Riz-pois Chiche
FRP : Formule Riz-pois Protéagineux
LBMA : Laboratoire de Biophysique et Matériaux Alimentaires
CRF : Couscous Riz-Fèverole
CRP : Couscous Riz-Pois protéagineux
CRC : Couscous Riz-poisChiche
CT : Couscous Témoin
CSG : Couscous sans Gluten
GS : Grosse semoule
FS : Fine semoule
PSG : Pains Sans Gluten
IPM : Indice de Prise en Masse
DD : Degré de Délitescence
IG : Indice de Gonflement
CA : Capacité d'Absorption d'eau
MSR : Méthodologie des Surfaces de Réponses
VSP : Volume spécifique
HPMC : HydroxyPropylMéthyl Cellulose

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

La maladie cœliaque est une entéropathie auto-immune induite par l'ingestion de gluten chez des sujets génétiquement prédisposés (SCHMITZ & GARNIER-LENGLINE, 2008). Elle se traduit par une atrophie de la muqueuse du grêle proximal, régressive après exclusion alimentaire du gluten de blé et des prolamines équivalentes des autres céréales réputées toxiques telles que le seigle et l'orge (CLOT *et al.,* 2001).

La maladie cœliaque est considérée actuellement comme l'une des maladies gastro-intestinales les plus fréquentes. Elle est très répandue dans les pays européens avec une prévalence qui serait située entre 0,1 et 3,3‰ et semble aussi élevée en Afrique du nord avec 1,4‰ (TALAL *et al.,* 1997 ; CLOT *et al.,* 2001 ; DENERY-PAPINI *et al.,* 2001). Chez des enfants du Sahara Occidental, CATASSI *et al.,* 1999 rapportent des prévalences plus élevées avec 5 à 6‰ de cas d'une moyenne d'âge de 7,4 ans. Cette affection reste rare en Amérique du nord et en Inde, exceptionnelle en Afrique noire et ignorée en Chine (HADJI 2000). En Algérie, une insuffisance de l'information est notée. Les seules données disponibles sont celles de BOUDRAA *et al.,* (1996) ainsi que BOUDRAA et TOUHAMI (1997) qui, pour la ville d'Oran, annonçaient une incidence moyenne sur une période de 20 ans de 2‰ naissances vivantes et, en fin de l'année 1994, une prévalence de 21,1‰ chez des enfants de moins de 15 ans.

Il est connu que le traitement de la maladie cœliaque est diététique et repose sur l'exclusion du gluten contenu dans certaines céréales essentiellement le blé, le seigle et l'orge. Par ailleurs, les céréales occupent une place importante dans l'alimentation mondiale et les pays situés au sud du bassin méditerranéen, dont l'Algérie, font partie de ceux qualifiés de type céréalier à blé (FAO, 2009). Ainsi, le gluten présent dans de nombreuses préparations alimentaires algériennes, rend le suivi du Régime Sans Gluten (RSG), difficile et peut favoriser la marginalisation de ces malades de la société. En Algérie, les cœliaques souffrent d'un manque dans la disponibilité et la diversité d'aliments de consommation courante exempt de gluten. Les aliments diététiques commercialisés sont pour la plupart importés et coûtent déjà dans leurs pays d'origine 10 à 15 fois plus chers que ceux habituellement consommés. Quelques produits locaux sont lancés sur le marché mais cela reste insuffisant. De façon globale, les besoins spécifiques des malades cœliaques sont

partiellement ou parfois faiblement couverts par les produits qui circulent dans le marché algérien.

C'est dans le cadre de cette thématique que s'inscrit ce travail de thèse qui vise à améliorer la situation alimentaire des malades cœliaques algériens, voire leur état nutritionnel. L'idée est d'approcher, dans un premier temps, les malades cœliaques en vue de les situer par rapport à la population algérienne et de recenser les difficultés de régime auxquelles ils sont confrontés quotidiennement puis, dans un deuxième temps, de contribuer, par la formulation-fabrication d'aliments sans gluten, à répondre aux besoins exprimés.

Il s'avère qu'en tête de liste des produits réclamés, se placent les produits céréaliers traditionnels ou non tels ceux résultant de processus de panification ou de pastification. Par conséquent, l'appel lancé sollicite des formulations pour l'obtention de produits d'imitation à partir d'ingrédients dépourvus de gluten. Or, cette protéine est connue pour jouer un rôle techno-fonctionnel important dans la réussite de la fabrication des produits que l'on souhaite imiter.

Dans le souci de présenter un aliment diététique léger et nutritif, l'ingrédient de base choisi pour la formulation proposée dans cette étude est le riz. Deuxième des céréales les plus produites dans le monde (FAO, 2009), celui-ci se distingue par sa digestibilité et son pouvoir énergétique élevés, en particulier par rapport au maïs (MATHEWS *et al.* 1999 ; BELAY *et al.* 1997), autre céréale pouvant être envisagée dans la formulation. En revanche, compte tenu de l'état de certains jeunes consommateurs cœliaques qui présenteraient un retard de croissance, est envisagée une supplémentation à l'aide de légumes secs en vue de rehausser la valeur nutritionnelle de l'aliment proposé. Un meilleur équilibre en acides aminés est souhaitable pour une meilleure utilisation, par l'organisme, de l'apport protéique proposé. En plus d'une correction positive du goût et de la couleur blanche du riz, l'enrichissement en protéines de la formule laisse espérer une amélioration des propriétés rhéologiques des pâtes sans gluten résultantes. L'amélioration attendue doit être vérifiée et l'aptitude technologique des formules des aliments envisagés devient par conséquent l'objet principal de l'étude.

Basées sur une supplémentation dans des proportions massiques de 2-1 en céréales-légumes secs, les formules dont la faisabilité technologique est à vérifier sont au nombre de trois : Riz- Fèverole (FRF), Riz-Pois chiche (FRC) et Riz-Pois protéagineux (FRP)

Ces formules font l'objet de recherche de l'équipe « Transformation et Elaboration de Produits Agro-alimentaires » rattachée au laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.) de l'Institut de N.A.T.A.A., où l'étude de faisabilité est envisagée pour divers aliments sans gluten dont les farines infantiles, les biscuits, les pâtes laminées et les crêpes algériennes.

Dans la présente recherche et conformément aux objectifs signalés, sont visées :

1. l'estimation de la prévalence de la maladie cœliaque dans quelques villes de l'Est algérien, la diététique associée au régime sans gluten et ses difficultés auprès des malades algériens ;

2. l'étude de l'aptitude technologique des formules à base de riz et de légumes secs dans la fabrication de couscous et de pain.

Aussi, la suite du manuscrit présente en quatre parties l'enchaînement de l'expérimentation menée. La première d'entre elles traite de la maladie cœliaque et du régime sans gluten en Algérie. La deuxième partie est consacrée à la formulation sans gluten proposée. Au niveau de la troisième partie, est abordée l'aptitude des formules proposées à la fabrication de couscous sans gluten. La quatrième présente l'étude du comportement rhéologique de pâtes issues de l'une des trois formules (formule riz - fèverole) et son aptitude à la panification.

Partie 1 : MALADIE CŒLIAQUE ET REGIME SANS GLUTEN EN ALLGERIE

Sommaire Partie 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction.. 5
I. DEFINITION DE LA MALADIE CŒLIAQUE.. 5
II. EPIDEMIOLOGIE.. 6
III. MECANISME PATHOGENIQUE.. 6
IV. FORMES DE LA MALADIE.. 7
V. TRAITEMENT : *LE REGIME SANS GLUTEN*.. 7
V.1. Mise en œuvre et conduite du régime sans gluten (RSG).. 8
V.2. RSG et équilibre alimentaire.. 9
V.3. RSG et lactose.. 11

MATERIEL & METHODES

I. LIEU DE L'ENQUETE.. 12
II. POPULATION ETUDIEE ET SOURCES D'INFORMATIONS.. 12
III. CONTENU DE L'ENQUETE.. 12
IV. CONDUITE DE L'ENQUETE.. 13
V. TRAITEMENT DES DONNEES DE L'ENQUETE.. 14
VI. ANALYSE STATISTIQUE.. 14

RESULTATS & DISCUSSION

I. RESULTATS DE L'ENQUETE SUR LA PREVALENCE DE LA MALADIE CŒLIAQUE. 15
I.1. Identification de la population étudiée.. 15
I.1.1. Répartition des malades par sexe.. 15
I.1.2. Répartition des malades selon l'âge.. 16
I.1.3. Répartition des malades selon l'Indice de Masse Corporelle (IMC).. 17
I.2. Prévalence de la maladie cœliaque.. 18
II. RESULTATS DE L'ENQUETE SUR L'ALIMENTATION DES MALADES CŒLIAQUES.. 18
II.1. Exemple de produits sans gluten commercialisés en Algérie.. 18
II.2. Aliments souhaités ou difficiles à fabriquer.. 19
II.3. Problèmes rencontrés.. 20

Conclusions.. 22
Références bibliographiques.. 23
Production scientifique.. 25

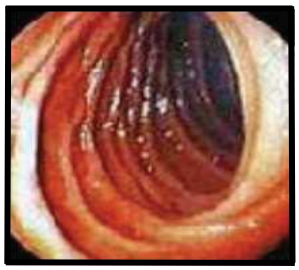
Liste des tableaux

Tableau 1. Teneurs en glucides complexes pour 100 g de produit non cuit..... 10
Tableau 2. Teneurs en protéines pour 100 g de produit non cuit..... 10
Tableau 3. Période d'étude et nombre d'habitants par ville étudiée..... 12
Tableau 4. Nombre de malades cœliaques recensés au niveau de quelques villes de l'Est algérien..... 15
Tableau 5. Répartition des malades cœliaques par sexe dans les cinq villes de l'Est algérien étudiées..... 16
Tableau 6. Répartition des malades cœliaques par âge dans les cinq villes de l'Est algérien étudiées..... 16
Tableau 7. Répartition des malades cœliaques selon la corpulence dans les cinq villes de l'Est algérien étudiées..... 17
Tableau 8. Exemples de produits sans gluten commercialisés en Algérie..... 19
Tableau 9. Alimentation des malades cœliaques algériens..... 20

Liste des figures

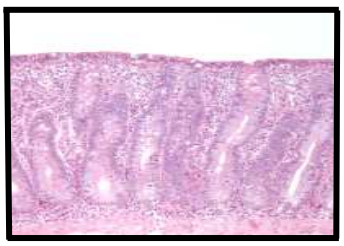
Figure 1. Maladie cœliaque..... 5
Figure 2. Villes enquêtées dans l'Est Algérien (Jijel, Mila, Guelma, Batna et Khenchela)..... 12

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
Partie 1



Duodénum normal Aspect d'une muqueuse pâle

a. *Endoscopie digestive haute : Duodénum*



Intestin grêle normal

Maladie cœliaque avec :
- Atrophie villositaire
- Augmentation des LIE
- Hyperplasie cryptique

b. *Histologie de l'intestin grêle*

Figure 1. Maladie cœliaque : ***a.*** Endoscopie digestive haute, ***b.*** coupes histologiques de l'intestin grêle (CELLIER *et al* 2000 ; 2006)

Introduction

Dans cette première partie du travail, la maladie cœliaque est présentée en tant que pathologie tout en essayant de la situer dans le monde puis en Algérie. Le traitement de cette affection étant le régime sans gluten, ce dernier sera approché. La description de l'enquête menée auprès de la population étudiée au niveau de cinq villes de l'Est algérien est décrite. Les résultats de cette partie porteront essentiellement sur les réponses apportées par l'enquête où seront détaillées la prévalence de la maladie et l'alimentation des malades cœliaques algériens avec l'expression de leur besoin.

I. DEFINITION DE LA MALADIE CŒLIAQUE

La maladie cœliaque est une entéropathie auto-immune induite par l'ingestion de gluten chez des sujets génétiquement prédisposés (MÄKI and COLLIN, 1999 ; MATUCHANSKY *et al.* 1999 ; SCHMITZ et GARNIER-LENGLINE 2008). Elle se traduit par une atrophie de la muqueuse du grêle proximal (Figures 1. a et b), régressive après exclusion alimentaire du gluten de blé et des prolamines équivalentes des autres céréales réputées toxiques : seigle et orge (CLOT *et al.*, 2001).

Concernant l'avoine, MATUCHANSKY *et al.*, 2004 ; SCHMITZ 2007 ainsi que SANTE CANADA 2007 concluent que la majorité des personnes atteintes de la maladie cœliaque peuvent tolérer des quantités modérées d'avoine pure, non contaminée par d'autres grains céréaliers tels que le blé, l'orge et le seigle. D'après ces auteurs, la portion d'avoine devrait être limitée et varier de 20 à 25 grammes/jour pour les enfants et de 50 à 70 g/jour pour les adultes. Ces auteurs pensent que cette relative tolérance serait sans doute liée au fait que l'avénine, ne représente que 10 à 15 %p. Cent des protéines de l'avoine et que le nombre de séquences toxiques y est faible.

Cette affection fut observée pour la première fois en 1941 par DICKE ayant annoncé la toxicité de certaines céréales (blé, seigle, orge et avoine). En 1953, DICKE *et al.* ont démontré la toxicité clinique de la gliadine, protéine représentant la fraction alcoolo-soluble du gluten, lui même fraction des protéines de blé insolubles dans l'eau. Décrite en 1988 par GEE, les appellations successives de sprue, stéathorrée idiopathique, sprue non tropicale, sprue cœliaque et entéropathie sensible au gluten, sont celles des découvertes thérapeutiques la concernant.

II. EPIDEMIOLOGIE

Il semble que cette maladie gastro-intestinale est l'une des plus fréquentes. Elle est très répandue dans les pays Européens avec une prévalence entre 0,1 et 3,3 ‰. Cette prévalence reste aussi élevée en Afrique du Nord avec 1,4‰ (TALAL *et al.*, 1997 ; CLOT *et al.*, 2001 ; DENERY-PAPINI *et al.,* 2001). Par ailleurs, au Sahara Occidentale, on note les plus hautes prévalences (5 à 6‰) de la maladie cœliaque sur des enfants avec une moyenne d'âge de 7,4 ans (CATASSI *et al.* 1999). Ces auteurs expliquent que ces chiffres énormes seraient probablement le résultat de facteurs génétiques liés à ce peuple. Cette affection reste rare en Amérique du Nord et en Inde, exceptionnelle en Afrique Noire et ignorée en Chine (HADJI 2000). Dans les pays maghrébins, BOUDRAA *et al.,* 1996 ainsi que BOUDRAA et TOUHAMI 1997, citent une incidence de 1,2 ‰ naissances vivantes en Tunisie à comparer à 1,3 chez les maghrébins de souche résidant en région Midi-Pyrénées (France). En Algérie, une insuffisance de l'information est notée. Les seules données disponibles sont celles de ces auteurs pour le cas de la ville d'Oran. Les chiffres validés de ces derniers, révèlent une incidence moyenne de 2 ‰ naissances vivantes sur ces 20 dernières années et une prévalence de 21,1 ‰ enfants âgés de moins de 15 ans à la fin de l'année 1994. En se basant sur ces données, ces chercheurs placent les pays du Maghreb parmi les pays à incidence moyenne et certainement à prévalence record compte tenu de la pyramide des âges de ces derniers.

III. MECANISME PATHOGENIQUE

Selon MATUCHANSKY, ROUSSEAU et MORIN 2004, les prolamines des quatre céréales classiquement toxiques pour la muqueuse intestinale des cœliaques sont les α-gliadines de blé, les fractions prolamines du seigle (sécalines), de l'orge (hordénines), et, probablement à un plus faible degré, celles de l'avoine (avénines). Ces protéines sont appelées prolamines à cause de leur richesse en proline et en glutamine. Pour l'avoine, les protéines de réserve majeures sont des globulines. D'après DENERY-PAPINY 2001, les prolamines de l'avoine ne représentent que 10 % des protéines totales du grain au lieu de 70 % pour le blé. Cette importante différence pourrait être à l'origine de la meilleure tolérance de l'avoine par les malades cœliaques.

La consommation de protéines contenant la gliadine chez les sujets prédisposés entraîne une réponse auto immune au niveau de la muqueuse intestinale, responsables de la maladie cœliaque (MATUCHANSKY, ROUSSEAU et MORIN 2004).

Lorsque la gliadine, fraction protéique des céréales, traverse l'épithélium intestinal, elle est déamidée par la TransGlutaminase tissulaire (TG). Cette dernière est une enzyme produite abondamment dans la sous muqueuse intestinale (chorion). La gliadine qui n'est pas elle même immunogène, est transformée en acide glutamique qui lui est immunogène. Chez les sujets prédisposés porteurs de molécules HLA DQ2 et HLA DQ8, les CD4+ s'activent spécifiquement et sont responsables d'une réponse humorale avec production d'anticorps et une réponse cellulaire avec activation des lymphocytes cytotoxiques qui vont tous s'attaquer à la muqueuse intestinale (DIETERICH *et al.* 1997 ; BIENVENU 2006 ; CELLIER 2006).

IV. FORMES DE LA MALADIE

La maladie cœliaque peut surgir à tout âge. Elle est précoce avant 5 mois surtout si l'introduction du gluten est prématurée (BOURRILLON, 2000). Le plus souvent, elle apparaît chez les sujets en bas âge entre 6 mois et 2 ans, période correspondant au sevrage du lait maternel. Dans ces cas, on parle de "*formes du nourrisson et du très jeune enfant*". Cependant, elle peut survenir chez les enfants d'environ 9 ans et on parle dans ce cas de "*formes tardive de l'enfant*". Elle peut même parfois parvenir plus tard, à l'âge adulte entre 30 et 59 ans et plus précocement chez les femmes que chez les hommes (BOUDRAA *et al.* 2003 ; BAYROU 2001), et on parle dans ce cas de "*formes adultes*".

V. TRAITEMENT : LE REGIME SANS GLUTEN

L'exclusion totale et définitive du gluten est à la base du traitement de la maladie cœliaque (MÄKI and COLLIN, 1997 ; FASANO and CATASSI, 2001 ; FARELL and KELLY, 2002). Le principe du régime sans gluten repose sur la suppression de tous les aliments contenant l'une et/ou l'autre des quatre céréales toxiques (blé, seigle, orge et avoine).

Cette suppression de gluten est difficile à appliquer vu sa présence dans de nombreuses préparations industrielles. Donc, pratiquement une question importante est soulevée : existe-il un seuil en dessous duquel des quantités minimes de gluten sont tolérables ? Selon SCHMITZ 2007, il est difficile de répondre à cette question pour deux raisons :

- La sensibilité au gluten est variable d'un malade à l'autre et d'un âge à un autre chez le même patient.
- La deuxième raison tient aux difficultés pratiques qu'il y a à garantir la composition exacte des aliments.

Plusieurs études ont cherché à déterminer, malgré tout, la quantité minimale de gluten acceptable dans un régime. Récemment il a été proposé que ce seuil soit fixé à 100 ppm pour un aliment donné qui est bien toléré cliniquement et histologiquement (COLLIN *et al.*2004). De même, l'innocuité des produits contenant de l'amidon de blé a été démontrée de façon convaincante (COLLIN *et al.*2004 ; KUPPER 2005).

Actuellement, un aliment est considéré *exempt de gluten* Selon le *Codex Alimentarius* établi par l'OMS et cité par CEGARRA 2006, s'il provient :

- d'une céréale dont la prolamine n'est pas toxique (riz, maïs, sarrasin, millet) ;
- d'une céréale potentiellement toxique mais dont la teneur résiduelle en azote après traitement ne dépasse pas 50 mg/100g de poids sec, soit 10 mg de gliadine pour 100 g de poids sec ;
- d'un amidon préparé à partir de graines de céréales contenant moins de 0,3 % de protéines dans l'extrait sec.

FARELL and KELLY (2002), signalent qu'en cas de carence sévère en vitamines (A, B_{12}, E, K B_9) et/ou en oligoéléments (Mg^{2+}, Fe^{2+}) et en macroéléments (Ca^{2+}), s'impose leur addition au régime sans gluten.

L'objectif du régime sans gluten chez le cœliaque est double. Il vise à corriger les anomalies cliniques, biologiques et histologiques de la maladie et à diminuer le risque à long terme d'osteopénie et des complications néoplasiques, notamment le lymphome malin de l'intestin grêle (MATUCHANSKY *et al.* 2004).

V.1. MISE EN ŒUVRE ET CONDUITE DU REGIME SANS GLUTEN (*RSG*)

En théorie, le Régime Sans Gluten (RSG) paraît simple, mais, en pratique, son application est contraignante et constitue un véritable défi pour les malades ainsi que pour les parents, diététiciens et médecins qui les suivent. Le gluten étant présent dans de très nombreux aliments, non précisés dans de nombreuses préparations, rend le suivi du régime surtout au début difficile, notamment par la perte de convivialité, voire l'exclusion sociale qu'il peut entraîner, mais aussi par le surcoût des produits de substitution (VAHEDI et MATUCHANSKY 2001 ; MATUCHANSKY *et al.,* 1999 ; CEGARRA 2006).

La vigilance est de règle surtout pour certaines sources insolites : chewing-gum, moutardes, excipients de médicaments ... (CARTER and TERLAND, 2000 ; HADJI *et al.* 2000). L'ingestion de produits laitiers peut aggraver les symptômes gastro-intestinaux en raison d'un déficit secondaire en lactase chez les cœliaques non traités (MATUCHANSKY *et al.* 2004

Il est donc impératif que le cœliaque apprenne à detecter la présence de gluten sur les étiquettes des produits alimentaires. Le médecin également doit connaître la présence de gluten dans les excipients des médicaments. L'adhésion aux associations de malades mérite d'être encouragée, notamment pour faciliter le suivi du régime. En Annexe 1, nous donnons des exemples sur quelques aliments autorisés et interdits pour malades cœliaques répertoriés par MATUCHANSKY *et al.* 2004.

D'après BOURRILLON 2000, il est difficile de connaître la durée du régime sans gluten. La plupart des équipes anglo-saxonnes prescrivent un régime à vie. Cependant, il semble exister des phénomènes d'immunotolérance au cours de l'âge adulte aboutissant à de véritables guérisons cliniques et histologiques.

V.2. *RS*G et équilibre alimentaire

Pour concilier un RSG et un bon équilibre alimentaire, il est indispensable de varier son alimentation (SCHMITZ 2007). Heureusement, il existe de nombreux aliments naturellement exempts de gluten : riz, maïs, légumineuses, lait et produits laitiers, viande, poisson, huiles et graisses..., qui permettent donc de s'alimenter de façon équilibrée et diversifiée. Les substituts de produits avec gluten doivent apporter qualitativement et quantitativement autant de glucides, de protéines, de fibres mais aussi plus de vitamines et de minéraux afin de palier au déficit engendré par leur malabsorption intestinale dans le cas de cette maladie.

Les glucides : Les céréales (riz, maïs), sont d'excellentes sources de glucides majoritairement complexes (sucres lents), tout comme les légumes amylacés (pommes de terre, légumes secs, etc.). La pomme de terre en présente une teneur plus faible mais elle est consommée en plus grande quantité au cours d'un repas (Tableau 1) (JULIANO 1994 ; SOUCI *et all.* 1986).

Tableau 1. Teneurs en glucides complexes pour 100 g de produit non cuit (JULIANO 1994 ; SOUCI *et al.* 1986).

	Céréales			Autres	
	Blé	Riz	Maïs	Légumes secs	Pomme de terre
g de glucides complexes pour 100 g de produit	63	77	66	50	16
100 g de blé apportant autant de glucides complexes que	100	81	95	126	394

Les protéines : Le riz, le maïs et les légumes secs sont de bons substituts protéiques (tableau 2). Mais pour un meilleur équilibre protéique, il est indispensable d'associer des protéines d'origine animale (viande, œuf, poisson, ...), des céréales et/ou des légumes secs. En effet, seule cette association fournit à notre organisme des protéines en quantité et en qualité satisfaisantes. La complémentation consiste à associer une protéine pauvre en un acide aminé particulier à une protéine riche en cet aminoacide (ADRIAN *et al.* 1981). Ainsi, en dépit de leur carence en lysine, les protéines céréalières constituent un complément protéique excellent lorsqu'elles sont associées aux légumineuses pour lesquelles la méthionine constitue le facteur limitant (FAO 1982).

Tableau 2. Teneurs en protéines pour 100 g de produit non cuit (JULIANO 1994 ; SOUCI *et al.* 1986).

	Céréales Crues			Autres Crus	
	Blé	Riz	Maïs	Légumes secs	Pomme de terre
Teneurs en g protéines pour 100 g de produit	14	8	18	23	2
100 g de blé apportant autant de glucides complexes que	100	175	78	61	700

Les fibres : Le grain de blé est beaucoup plus riche en fibres que les autres céréales : 100 g de blé apporte 10 g de fibres. Les légumes secs, qui apportent 15g de fibres pour 100g, se présentent donc comme d'excellents substituts (JULIANO 1994 ; SOUCI *et all.* 1986).

La vitamine PP : Le riz et le maïs sont moins riches en vitamine PP que le blé (JULIANO 1994). Donc en RSG, on risque une carence en cette vitamine. Sachant qu'elle , elle est indispensable au bon fonctionnement de notre organisme. On trouve la vitamine PP dans la viande, les abats, les légumes secs, les fruits ainsi que dans la pomme de terre.

V.3. RSG et lactose

Dans les cas sévères et non traités d'intolérance au gluten, on constate des symptômes de malabsorption notamment du calcium, du magnésium, des vitamines solubles A, B12, D, E, et K, de folates et de fer (ALBEAUX-FERNET 1984). Si les symptômes initiaux sont sévères, tel que nausées, gonflements et diarrhées, l'abstention d'aliments contenant du lactose, en plus du régime sans gluten, est conseillée jusqu'à ce que la muqueuse intestinale soit guérie. L'intolérance au lactose se normalise souvent en quelques mois mais il faut beaucoup plus de temps pour les problèmes liés au gluten.

MATERIEL & METHODES
Partie 1

Figure 2. Villes enquêtées dans l'Est Algérien (Jijel, Mila, Guelma, Batna et Khenchela)

La méthodologie de la première partie de cette thèse a été consacrée à l'estimation de la prévalence de la maladie cœliaque et sa diététique associée dans quelques villes de l'Est algérien. Pour cela, une enquête transversale visant à recenser les cas de malades cœliaques pouvant y exister et d'approcher leur modes alimentaire ainsi que les difficultés vécues a été réalisée.

I. LIEU DE L'ENQUETE

L'enquête a été réalisée dans 5 villes de l'Est Algérien (Figure 2) : Jijel, Batna, Khenchela, Guelema et Mila. Celles-ci ont été choisies essentiellement d'une part pour des raisons des commodités d'accès et d'autre part, pour l'absence de chiffres sur la maladie cœliaque dans ces villes.

Dans cette étude, ***la Prévalence*** de la Maladie Cœliaque (PMC) est définie comme étant le rapport entre le nombre de cas recensés sur une période donnée, sur le nombre de la population totale en fin de cette période pour chaque ville étudiée (Tableau 3).

Tableau 3. Période d'étude et nombre d'habitants par ville étudiée

	Période d'étude	**Nombre d'années**	**Habitants en fin de période d'étude**
Jijel	1995-2002	7	413 160
Batna	– 1996-2003 – 1990-2003	7 (UDS) 13 (hôpital)	300 000
Khenchela	1997-2003	6	90 000
Mila	1993-2003	10	66 716
Guelma	1993-2003 1995-2003	10 (hôpital) 8 (UDS)	430 000

II. POPULATION ETUDIEE ET SOURCES D'INFORMATIONS

Le dépistage vise tous les malades cœliaques enfants et adultes fréquentant les services de santé (centre de Protection Maternelle et Infantile (PMI), les Unités de Dépistage et de Suivi (UDS), les médecins privés généralistes et spécialistes, les services de pédiatrie et de médecine interne des hôpitaux, …) ainsi que les crèches, au niveau des villes de Jijel, Batna, Khenchela, Mila et Guelma.

III. CONTENU DE L'ENQUETE :

Pour la réalisation de l'enquête, un questionnaire (Annexe 2) comportant trois parties a été préparé :

La première partie vise à identifier les malades. Elle comporte des informations sur le nom, le prénom, l'adresse, le sexe, le poids et l'âge des individus étudiés. Des données sur la maladie en elle même telles que l'âge de l'apparition des premiers troubles, les moyens de

diagnostic et les maladies associées. Ces données ont permis de classer et de décrire la population étudiée.

La deuxième partie du questionnaire concerne les pratiques de sevrage et comprend des questions permettant de détecter des troubles de comportement, de connaître les habitudes alimentaires des malades et la nature de l'allaitement avant et durant le sevrage ainsi que l'âge d'introduction des aliments de sevrage.

La troisième partie est consacrée au comportement des malades et à la diététique associée à la maladie cœliaque. Les malades sont interrogés sur les différentes préparations sans gluten faites à la maison, sur les aliments diététiques spécifiques achetés et sur les aliments autorisés et interdits. Ces données permettent d'avoir une idée du mode alimentaire des malades dans les villes de Jijel, Khenchela, Batna, Guelma et Mila.

IV. CONDUITE DE L'ENQUETE

La réalisation de l'enquête au niveau des willayates de Jijel, Batna, Khenchla, Guelma et de Mila s'est faite à l'aide d'étudiants de fin de cycles (BOUAB 2001, ACHOUR et KHATER 2003, BADIS 2003, CHERAIRIA 2003, et TOLHI 2004) que nous avons suivi nous même de près.

La préparation du questionnaire a nécessité 03 semaines. Avant d'arriver à sa forme finale, ce dernier a été expérimenté auprès de 14 malades au niveau d'une UDS de la ville de BATNA avant d'être vulgarisé au niveau du reste des villes enquêtées. Ce premier contact auprès des malades a permis de juger de la facilité de compréhension des questions posées et de la lourdeur du questionnaire en lui même.

La réalisation pratique de l'enquête s'est faite sur plusieurs étapes. Il a d'abord fallut avoir des autorisations des directeurs d'académies de chaque ville pour pouvoir accéder aux UDS. La liste des médecins spécialistes et généralistes a été obtenue par le directeur de la Direction De la Santé (D.D.S.) de chaque ville. Enfin des autorisations des directeurs d'hôpitaux des villes enquêtées ont permis l'accès aux services de pédiatrie et de médecine interne.

La durée de réalisation de l'enquête varie d'une ville à une autre. A Batna celle-ci a duré 1 mois, à Mila 5 mois, à Khenchela 4 mois, à Jijel 1 semaine et 4 mois à Guelma. Le dépistage des malades c'est fait par la consultation des registres des malades au niveau des hôpitaux et celui du suivi des élèves dans les UDS. Une fois énumérés et identifiés, les cas soupçonnés sont contactés pour confirmation remplissage du questionnaire.

Chez les médecin privés, le contact avec les malades s'est fait dans les cabinets et la plus part du temps par le médecin lui même pour des raisons de confidentialité des dossiers. Le remplissage du questionnaire s'est fait par les malades eux mêmes, par leurs mères lorsque ceux-ci sont petits, par nous même et parfois par les médecins généralistes ou spécialistes. Une bonne partie des données a également été fournie par les diététiciennes des hôpitaux auprès desquelles les familles notamment les mères des malades, viennent demander des recettes et échanger des idées sur telle ou telle préparation.

V. TRAITEMENT DES DONNEES DE L'ENQUETE

Le classement des malades cœliaques recensés en sujets normaux, maigres, en surpoids ou obèses a été réalisé en utilisant l'Indice de Masse Corporelle (IMC). Appelé aussi Indice de QUETELET, il est donné par le rapport du poids à la taille au carré (ROLLAND-CACHERA *et al.* 1991).

ROLLAND-CACHERA *et al.* (1991) ont élaboré pour les enfants et les adolescents (<18 ans), des courbes de corpulence par sexe et par âge au cours de la croissance sur lesquelles on positionnent les IMC (Annexe 4) :

- *Individus maigres* : IMC ≤ $10^{ème}$ centile ;
- *Individus normaux* : $10^{ème}$ centile < IMC ≤ $90^{ème}$ centile ;
- *Individus en surpoids* : $90^{ème}$ centile < IMC ≤ $97^{ème}$ centile ;
- *Individus obèses* : IMC > $97^{ème}$ centile.

Pour les adultes (≥18 ans), cet indice est comparé aux intervalles élaborés par la FAO/OMS 1992. :

- *Individus maigres* : IMC ≤ 18,5 ;
- *Individus normaux* : 18,5 < IMC ≤ 25 ;
- *Individus en surpoids* : 25 < IMC ≤ 30 ;
- *Individus obèses* : IMC > 30.

VI. ANALYSE STATISTIQUE

La saisie et le traitement des données de l'enquête sur la prévalence et la diététique associée de la maladie coeliaque est réalisé à l'aide d'*Epi info* version 5. Pour cela, nous avons réalisé un programme informatique (annexe 3) pour le traitement des données récoltées. Dans cette étude, le niveau de significativité est fixé à 0,05.

RESULTATS & DISCUSSION
Partie 1

I. RESULTATS DE L'ENQUETE SUR LA PREVALENCE DE LA MALADIE CŒLIAQUE

Cette partie de l'étude vise à estimer la prévalence de la maladie cœliaque dans quelques villes de l'Est algérien (Jijel, Batna, Khenchla, Guelma et Mila), d'approcher la diététique associée à la maladie et de recenser les difficultés rencontrées par les malades.

I.1. Identification de la population étudiée

Les informations recueillies au cours de l'enquête ont concerné tous les malades cœliaques enfants, adolescents et adultes fréquentant les services de santé (Unités de Dépistage et de Suivi (UDS), médecins privés généralistes et spécialistes, services de pédiatrie et de et de médecine interne des hôpitaux,) ainsi que les crèches et ce, au niveau des villes de Jijel, Batna, Khenchela, Guelma et Mila. Le dépistage s'est fait globalement sur une période allant de 7 à 13 ans, en fonction de la disponibilité des données (Tableau 4).

Tableau 4. Nombre de malades cœliaques recensés au niveau de quelques villes de l'Est algérien

	Période d'étude	**Nombre d'années**	**Nombre de cas**	**%**
Jijel	1995-2002	7	34	6,73
Batna	– 1996-2003 – 1990-2003	– 7 (UDS) – 13 (hôpital)	102	20,11
Khenchla	1997-2003	6	84	16,56
Mila	1993-2003	10	115	22,68
Guelma	1993-2003 1995-2003	10 (hôpital) 08 (UDS)	172	33,92
Total	-	-	*507*	*100*

I.1.1. Répartition des malades par sexe

La répartition des cas recensés par sexe (Tableau 5), montre pour toutes les villes étudiées que les sujets de sexe féminin (entre 53,04% et 59,52%) sont significativement plus touchés par la maladie que ceux de sexe masculin (entre 40,47% et 46,95%). Le sex-ratio définit par le rapport entre le nombre de sujets de sexe féminin sur ceux de sexe masculin (TKOUB 2008), varie de 1,12 à 1,47 au niveau de la population étudiée. Toutefois, les chiffres donnés pour ce rapport restent variables. Alors que BOUSFIHA *et al.*1999, soulignent un sex-ratio de 1 auprès d'une population d'enfants maghrébins, ROSTROM, MURRAY et KAGNOFF 2006 ainsi que TKOUB 2008, révèlent que cette maladie est deux à trois fois plus fréquente chez les femmes. Cependant, ces auteurs rapportent que ce sex-ratio

s'atténue actuellement avec l'augmentation du taux de diagnostic des formes cliniquement asymptomatiques.

Tableau 5. Répartition des malades cœliaques par sexe dans les cinq villes de l'Est algérien étudiées : Jijel, Batna, Khenchla, Guelma et Mila

	Filles		**Garçons**		**Total**
	Effectif	***%***	**Effectif**	***%***	**Effectif**
Jijel	20	*58,82*	14	*41,17*	34
Batna	60	*58,82*	42	*41,17*	102
Khenchla	50	*59,52*	34	*40,47*	84
Guelma	97	*56,39*	75	*43,60*	172
Mila	61	*53,04*	54	*46,95*	115
Total	288		219		507

I.1.2. Répartition des malades selon l'âge

L'âge des malades cœliaques est réparti sur une étendue allant de 0 à 42 ans (Tableau 6).

Tableau 6. Répartition des malades cœliaques par âge dans les cinq villes de l'Est algérien étudiées : Jijel, Batna, Khenchla, Guelma et Mila

	Jijel	**Batna**	**Khenchla**	**Guelma**	**Mila**	***Total***
[0-6[	25	21	15	28	22	***111***
[6-12[	8	18	23	61	38	***148***
[12-18[	1	28	30	61	44	***164***
[18-24[	0	21	9	13	5	***48***
[24-30[	0	6	3	6	3	***18***
[30-36[	0	7	2	2	2	***13***
[36-42[	0	1	2	1	1	***5***
Total	***34***	***102***	***84***	***172***	***115***	***507***

La majorité des cœliaques recensés sont des enfants et des adolescents avec 423 (83,43%) cas contre 84 (16,56%) adultes de plus de 18 ans. Ce nombre élevé enregistré pourrait être lié au fait que la majorité des enfants et adolescents soient scolarisés puisque pour cette tranche d'âge, la principale source d'information reste les UDS. Concernant les adultes, le faible effectif noté pourrait être dû au manque d'information auprès des structures enquêtées (médecins spécialistes ou généralistes, hôpitaux, ...). Par ailleurs, MASCART-LEMONE et SCHMIT 1998, OLIVES 2001 ainsi que LACHAUX 2006, rappèlent la fréquence des formes asymptomatiques chez les adultes.

I.1.3. Répartition des malades selon l'Indice de Masse Corporelle (IMC)

L'Indice de Masse Corporelle (IMC) est donné par le rapport du poids sur la taille au carré (kg/m^2) (OMS 1995). Il permet de classer les individus selon leur corpulence en sujets maigres, normaux, en surpoids ou obèses. Cette répartition se fait pour les adultes selon les intervalles donnés par la FAO/OMS 1992 (§ V, page 13) et par comparaison aux courbes de corpulence par sexe pour les enfants et adolescents jusqu'à 18 ans données par ROLLAND-CACHERA *et al.* 1991 (annexe 4).

Les données anthropométriques dont on dispose (Tableau 7), couvrent 100% de la population totale de malades dans les villes de Khenchla et Mila, 98,03% à Batna et 54,65% à Guelma. Aucune donnée anthropométrique n'a été enregistrée au niveau de Jijel ville. Ceci est essentiellement dû au fait que ce type d'information n'est pas systématiquement enregistré par les médecins.

Tableau 7. Répartition des malades cœliaques selon la corpulence dans les cinq villes de l'Est algérien étudiées : Jijel, Batna, Khenchla, Guelma et Mila

IMC	Jijel	Batna	Khenchla	Guelma	Mila	*Total*
Individus maigres	0	84	53	42	23	***202***
Individus normaux	0	16	30	47	79	***172***
Individus en surpoids	0	0	1	5	8	***14***
Obèses	0	0	0	0	5	***5***
Sans réponse	34	2	0	78	0	***114***
Total	***34***	***102***	***84***	***172***	***115***	***507***

La répartition des malades cœliaques en fonction de leur corpulence fait ressortir globalement plus de sujets maigres (202 cas) que de normaux (172 cas) dans les villes étudiées. La revue détaillée des chiffres montre plus de cas maigres dans les villes de Batna et de Khanchla (137 cas) contre plus de sujets normaux dans les villes de Guelma et Mila (126 cas). La maigreur pourrait être le résultat soit d'un régime alimentaire mal ou non suivi soit à une alimentation sans gluten déséquilibrée. La présence d'individus en surpoids ou obèses pourrait être liée à des facteurs variables pouvant être selon JOURET et TAUBER 2001, génétiques, hormonaux ou environnementaux (déséquilibre alimentaire, sédentarité, mode de vie, ...).

I.2. Prévalence de la maladie cœliaque

La prévalence de la maladie cœliaque notée au cours de l'enquête menée sur quelques villes de l'Est algérien est d'au moins 0,25 ‰ à Jijel, 0,3 ‰ à Batna, 0,88 ‰ à Khenchela, 1,4‰ à Guelma et 1,7 ‰ à Mila en fin 2003. La prévalence dans la ville de Mila reste de loin la plus élevée ($p<0,05$). La prévalence moyenne totale est d'au moins 0,90 ‰ au niveau des villes étudiées, ce qui n'est pas très loin des chiffres donnés pour l'Afrique du Nord (1,4‰) (HADJI 2000).

Par ailleurs, les chiffres globaux de prévalence obtenus sont à prendre avec prudence. MASCART-LEMON et SCHMIT 1998, HADJI 2000, FARREL and KELLY 2002 ainsi que BOUDRAA *et al* 2003, soulignent que la prévalence réelle de la maladie cœliaque serait beaucoup plus élevée vu la variabilité de son expression clinique, l'existence de formes cliniques silencieuses et latentes estimées à 4‰ ainsi que la méconnaissance des formes familiales. A ceci, une multitude d'autres facteurs seraient à l'origine de la sous estimation de la prévalence de cette maladie en Algérie, notamment en raison :

→ du refus de collaboration d'un certain nombre de médecins ;

→ de l'insuffisance ou parfois du manque de l'information au niveau des hôpitaux et des UDS par absence des registres.

II. RESULTATS DE L'ENQUETE SUR L'ALIMENTATION DES MALADES CŒLIAQUES

II.1. Exemple de produits sans gluten commercialisés en Algérie

En Algérie, l'alimentation des malades cœliaques reste peu disponible et faiblement diversifiée. L'enquête faite auprès des malades cœliaques de quelques villes de l'Est algérien entre 2004 et 2008 a révélé que les produits sans gluten du commerce étaient pour leur majorité des produits d'importation, chers, pas à la porté de tous et de faible palatabilité (Tableau 8).

Tableau 8. Exemples de produits sans gluten commercialisés en Algérie (BENATALLAH *et al.*, 2004, 2008)

PRODUITS ET PAYS DE FABRICATION	COMPOSITION DE BASE	PRIX (DA/kg)
▪ ***PRODUITS LOCAUX***		
– MACCARONI – AÏCHE	**Pâtes :** Farine de riz et de maïs, amidon de maïs, mono et diglycérides, sel.	260, 00 154,00
– NOGLUT le Gâté	**Biscuit :** Farine de riz, lait écrémé en poudre, huile végétale, bicarbonate de sodium, sucre, œufs, arôme, sel.	420,00
▪ ***PRODUITS IMPORTES***		
– NESTLE (*France*)	**Farine infantile :** Farine de riz, amidon de maïs, traces de lait, banane (12%), poire (2,4%), pyrophosphate de fer, maltodextrines, vanilline, calcium (200 mg), carbonate de calcium, vitamines (A, D, E, C, B_1, folacine, biotine)	670,00
– BLEDINE (*France*)	**Farine infantile :** Farine de riz à 60 %, graisse végétale, lécithine, sucre, fer élémentaire, maltodextrines, vitamines (E, C, B_{11}, pp, B_6, B_9, B_8, B_5)	640,00
– VIGOR Baby (*France*)	**Farine infantile :** Farine de riz, amidon de maïs, sucre, sels minéraux, dextromaltose, vitamines (K, D, B_1, B_2, B_5, B_6, B_8, B_{12}, niacine), Cu (4.5 mg).	560,00
– VEGELOSE (*France*)	**Farine infantile :** Farine de riz et de germe de blé, amidon de maïs, farine de soja délipidée, huile d'arachide et de soja, lécithine de soja, saccharose, carbonate de calcium, banane, manioc, glucose, chlorure de sodium, vanille naturelle, acide citrique, acide ascorbique, tocophérols.	2000,00
– NOGLUT (*Espagne*)	**Farine pour pain et biscuits :** Farine de riz, poudre de lait, caséïnates, levulose (11 g), hydroxypropylméthyl cellulose, sucre, arômes, sel, amidon de pomme de terre	700,00

II.2. Aliments souhaités et/ou difficiles à fabriquer

Dans le Tableau 9, est résumé ce qui ressort de l'enquête comme aliments sans gluten élaborés par les ménages (*EM*), souhaités par les malades (*S*), non disponibles sur le marché (*NDM*) ou difficiles à fabriquer (*DF*).

Tableau 9. Alimentation des malades cœliaques algériens (BENATALLAH *et al* 2004, 2008)

ALIMENTS	DESIGNATION
▪ **PRODUITS DE PANIFICATION**	
– Pain en baguette	*(NDM, DF, S)*
– Galette (riz et maïs)	*(EM, NDM, DF,S)*
– Pizza	*(NDM, DF, S)*
– Pain pour hamburger	*(NDM, DF, S)*
– Brioche	*(NDM, DF, S)*
▪ **GATEAUX TRADITIONNELS**	
– Makroud (maïs)	*(EM, NDM, S)*
– Bradj (maïs)	*(EM, NDM, S)*
– Besboussa (maïs)	*(EM, NDM, S)*
– Divers gâteaux secs	*(DF, S)*
– R'fiss tounsi (maïs)	*(EM, NDM, S)*
– Crêpes (maïs)	*(EM, NDM, S)*
▪ **PATES**	
– Couscous (maïs)	*(EM, NDM, DF, S)*
– Chekhchoukha	*(NDM, DF, S)*
– Aïch	*(DF, S)*
– Mahdjouba	*(NDM, DF, S)*
– Pâte à bourek	*(NDM, S)*
▪ **CONFISERIES**	
– Chocolat sans gluten	*(NDM, DF,S)*
– Bonbons divers sans gluten	*(NDM, DF, S)*
▪ **TOUTE PATISSERIE**	*(NDM, DF, S)*

Aliments sans gluten élaborés par les ménages (*EM*), souhaités (*S*), non disponibles sur le marché (*NDM*) ou difficiles à fabriquer (*DF*).

Le classement des aliments que les malades cœliaques algériens souhaiteraient voir sur le marché sont essentiellement par ordre décroissant de préférences :

1. pain, 2. couscous, 3. galette, 3. crêpes, 4. pizza, 5. bourek.

Ces aliments restent pour la plus part, difficiles à fabriquer principalement à cause de l'absence de gluten qui, d'un point de vue technologique permet la bonne tenue de la pâte et confère aux pains et aux galettes leur légèreté et élasticité.

II.3. Problèmes rencontrés

Durant la réalisation de l'enquête, deux catégories de problèmes ressortent, ceux liés au déroulement même de l'enquête et ceux rencontrés quotidiennement par les malades.

- Le premier groupe de problèmes était relatif à la non disponibilité des malades une fois recensés et des élèves en raison des examens de fin d'année qui ont coïncidé avec la période de l'enquête pour certaines villes (Batna, Mila et Guelma). Par ailleurs, certains médecins ont refusé de collaborer pour diverses raisons dont la confidentialité des dossiers des malades, le non classement des dossiers ou par peur de perturber les consultations. Le mauvais archivage des dossiers des malades au niveau des hôpitaux et des UDS et leur insuffisance en informations requises étaient un véritable handicap lors de l'enquête. Dans toutes les villes étudiées, nous avons eu des difficultés à accéder aux PMI. Des difficultés ont été également enregistrées lors du questionnement des mères sur l'alimentation de leurs enfants malades pendant la période de sevrage. Alors que ceci exige des détails faisant appel à la mémoire, rares sont les mères qui se souviennent parfaitement des quantités et de l'ordre d'introduction des aliments qu'elles ont utilisés pour le sevrage de leur enfant.

- La série de problèmes rencontrés quotidiennement par les malades cœliaques a concerné essentiellement :

– La non disponibilité et diversité des produits sans gluten ;

– Le coût élevé de ces produits ;

– La mauvaise qualité des produits sans gluten commercialisés sur le marché Algérien les rendant de faible palatabilité ;

– Lors de la fabrication de galette ou de pain sans gluten tout en substituant la farine de blé par celle du riz ou du maïs, les cœliaques ou leurs mères ont du mal à obtenir une pâte qui tienne et qui lève au cours de la fermentation et ce, en raison de l'absence de gluten qui confère à la pâte de blé l'essentiel de ses propriétés visco-élastiques. Ceci donne des produits non légers et peu appréciés une fois refroidis ;

– Le manque d'organismes spécialisés pour l'information des malades et leurs familles sur les détails de leur maladie et sa diététique associée (aliments interdits et recettes non coûteuses des aliments autorisés) ;

– Une insuffisance de motivation et de sensibilisation des industriels et des investisseurs dans le domaine de fabrication de produits sans gluten.

Conclusions

Sur une période maximale de 13 ans (1990-2003), les chiffres globaux de prévalence notés au sein des villes de Jijel, Batna, Guelma, Khenchela et Mila classent l'Est algérien parmi les régions où la maladie est fréquente (0,90‰) tout en restant en dessous des chiffres donnés pour l'Afrique du nord (1,4‰). Ces résultats sont cependant à considérer avec prudence vu la multitude de facteurs mis en cause dans la sous-estimation de cette affection.

Les résultats de l'enquête alimentaire auprès des malades cœliaques montrent que la diversification de leur alimentation est très limitée malgré l'importation d'un certain nombre de produits sans gluten et l'apparition sur le marché algérien de produits locaux. L'aliment que souhaiteraient les malades cœliaques fabriquer ou trouver sur le marché reste en première position le pain, suivi du couscous puis de la galette sans gluten. Ce besoin en pain vise à la fois le pain local (galette ou « *kesra* ») et les produits issus de la panification française avec ses variantes. Il est suivi par le couscous et les autres pâtes, traditionnelles ou non. Ce sont là les deux aliments ou catégories d'aliments les plus demandés et que nous avons choisi d'étudier en vue de répondre à l'appel lancé.

Références bibliographiques

ACHOUR M. et KHATER A. 2003. Maladie coeliaque : fréquence et diététique associée à Batna et comportement rhéologique d'ingrédients sans gluten. Mémoire d'ingénieur, INATAA, Université Mentouri de Constantine : 110p.

ADRIAN, J., LEGRAND, G. et FRANGNE, R. 1981. Dictionnaire de biochimie alimentaire et de nutrition. *Technique et Documentation, Lavoisier, 2ème édition*, Paris, 233 p.

ALBEAUX-FERNET, M. 1984. Régime sans gluten. Encyclopédie médico-chirurgicale. **1**, 4720 p.

BADIS A. H. 2003. Maladie coeliaque : Prévalence et diététique associée dans la ville de Khenchla. Mémoire d'ingénieur, INATAA, Université Mentouri de Constantine : 59p.

BAYROU, O. 2001. La maladie cœliaque *In :* Le vademecum du diagnostic (VINCENT D., BAYROU O., CHAPELON-ABRIC C. et TERLAND C.), *MMI éditions*, Paris, 1261 p.

BENATALLAH, Le., A. AGLI, et ZIDOUNE M. N. 2004. La maladie cœliaque : cas recensés de 1998 à 2003 et diététique associée a JIJEL, BATNA ET KHENCHELA. *Colloque ADELF- EPIBIO : "L'Epidémiologie et la prise de décision en Santé Publique"*, Santé Publique & Sciences Sociales (**10**), Oran : 88-89.

BENATALLAH, Le., A. AGLI, et ZIDOUNE M. N. 2008. La maladie cœliaque dans l'Est Algérien (Guelma et Mila) : prévalence et aliments souhaités par les malades. Livret des proceeding, *Séminaire SIBA*, Alger, *Algérie.*

BIENVENU, F. 2006. La sérologie pourra-t-elle suffire à poser le diagnostic de la maladie cœliaque chez l'enfant ? *Archives de pédiatrie*,**13** : 574-576.

BOUAB C. 2003. Maladie coeliaque et diététique associée à Jijel et comportement rhéologique d'ingrédients sans gluten. Mémoire d'ingénieur, INATAA, Université Mentouri de Constantine : 65p.

BOUDRAA, G. et TOUHAMI M. 1997. La maladie cœliaque de l'enfant au Maghreb. *Médecine et Nutrition Clinique*, N°1 : 7-18.

BOUDRAA, G., HACHELAF, W., BENBOUABDELLAH, M., BELKADI, M., BENMANSOUR, F. Z. et TOUHAMI, M. 1996. Prevalence of celiac disease in diabetic children and their first degree relatives in West Algeria : Screening with serological markers. *Acta paediatr suppl* : 58-60.

BOUDRAA, G., HACHELAF, W., BENBOUABDELLAH, M., BERRAHAL, N., HAMIDI, N. et TOUHAMI, M. 2003. Intérêt de la sérologie dans le dépistage de la maladie cœliaque. *Journées scientifiques de l'ANDRS : 17 et 18 décembre 2003*, 72-75.

BOURRILLON, A. 2000. Collection pour le praticien. Pédiaterie. *3ème édition, Masson*, Paris, 618 p.

BOUSFIHA, A. A., ETTAIBI, H., SEKKAT, S., SBIHI, M., HAD, N. et HADJ KHALIFA, H. 1999. HLA et maladie cœliaque : A propos de 44 enfants. *Revue maghrébine de pédiatrie*, **9** : 243-248.

CARTER, W. J. and TERLAND, C. 2000. Le vademecum de la consultation. Aide mémoire diagnostic, étiologie et thérapeutique. *MMI éditions*, Paris, 387 p.

CATASSI, C., RÄTSCH, I. M., GANDOLFI, L., PRATESI, R., FABIANI, E., EL ASMAR, R., FRIJIA, M., BEARZI, I and VIZZONI, L. 1999. Why is celiac disease endemic in the people of the Sahara ? *The LANCET*, **354** : 647–648.

CEGARRA, M. 2006. Le régime sans gluten : difficultés du suivi *Archives de pédiatrie*, **13** :576-578.

CELLIER C, FLOBERT C, CORMIER C, ROUX C, SCHMITZ J. 2000. Severe osteopenia in symptom-free adults with a childhood diagnosis of celiac disease. *Lancet*, 4, 806 p.

CELLIER, C. 2006. Actualités sur la maladie cœliaque. *Colloque Interface Gastro-Rhumato*, Hôpital Européen George Pompidou, Faculté Paris V, INSERM EMI, Paris, 02 décembre, 35 p.

CHERAIRIA M. 2004. Maladie coeliaque : Prévalence et diététique associée dans la ville de Guelma. Mémoire d'ingénieur, INATAA, Université Mentouri de Constantine : 45p.

CLOT, F., BABRON, M. C. et CLERGET-DARPOUX, F. **2001**. La génétique de la maladie cœliaque. Médecine thérapeutique/Pédiatrie. **4** : 263-267.

COLLIN, P., THORELL, L., KAUKINEN, K. and MÄKI, M. 2004. The safe threshold for gluten contamination in gluten-free products. Can trace amounts be accepted in the treatment of celiac disease ? *Aliment Pharmacol Ther*, **19** : 1277-1283.

DENERY-PAPINI, S., POPINEAU, Y. et GUEGUEN, J. 2001. Implication des protéines de céréales dans la maladie cœliaque. *Cah. Nut. Diét.*, **36**, 1, 2001 : 43-51.

DICKE, W. K. 1941. Simple dietary tratment for the syndrome of Gee-Harter. *Ned Tijdschr Geneeskd*, **85** : 1715-1716.

DICKE, W. K., WEIJERS, H. A. and VAN DE KAMER, H. Celiac disease : II. presence in the wheat of a factor having a deletorious effect in cases of celiac disease. *Acta Paediatr Scand*, 1953, **42** : 34-42.

DIETERICH, W., EHNIS, T., BAUER, M., DONNER, P., VOLTA, U. and RIECKEN, E. O. 1997. Identification of tissue transglutaminase as the autoantigen of celiac disease. *Nat Med*, **3** : 797-801.

F.A.O. 1982. Les graines de légumineuses dans l'alimentation humaine. Etude FAO : Alimentation et nutrition. *2ème édition*, Rome, 152 p.

F.A.O. 2009. Perspectives des récoltes et situation alimentaire- N.01 : 44 p.

FARELL, R. J. and KELLY, C. P. 2002. Celiac sprue. *N. Engl. J. Med*, **346** : 180-188 et **347** : 446-448.

FASANO, A. and CATASSI, C. 2001. Current approaches to diagnosis and treatment of celiac disease : An evolving spectrum. *Gastroenterology*, 120 : 636-651.

GEE, S. **1988.** On the celiac affection. *St Barth. Hosp. Rep.*, **24** : 17-20.

HADJI, M. A. 2000. Diarrhées chroniques de l'enfant. La maladie cœliaque. *La revue médico- pharmaceutique*, **13**, Mars –Avril 2000 : 23-30.

HADJI, M. A., ADJAL, S. A., AYAD, N., KEDDARI, M., KHELAFI, N., MERTANI, A. et SOKHAL S. 2000. Actualité sur les diarrhées chroniques de l'enfant. *La revue médico-pharmaceutique*, **13** : 23-30.

JOURET, B. et TAUBER, M. 2001. Quels sont les enfants à risque de devenir des adultes obèses ? *Cah. Nutr. Diét*, **36** : 117-122.

JULIANO, B. O. 1994. Le riz dans la nutrition humaine. Collection FAO : Alimentation et nutrition **26**, IRRI (Institut International de Recherche sur le Riz), FAO, Rome : 180 p.

KUPPER, C. 2005. Dietary guidelines and implementation for celiac disease. *Gastroenterology*, **128** : 121-127.

LACHAUX, A. 2006. Les formes cliniques trompeuses de la maladie cœliaque. *Archives de pédiatrie*, **13** : 572-574.

LAPPE, F.M. 1982. Diet for a Small Planet. *10th anniversary edition, Ballantine Books*. New York, 230 p.

MÄKI, M. and COLLIN, P. 1997. Celiac Disease. *The Lancet*, **349** : 1755-1759.

MASCART-LEMONE, F. et SCHMIT, A. 1998. Maladie coeliaque de l'adulte. Encyclopédie Médico-Chirurgicale 9-053-A-20 : 1-6.

MATUCHANSKY, C., ROUSSEAU, S. et MORIN, M. C. 2004. Maladie cœliaque de l'adulte : Actualités du régime sans gluten. *Cah. Nutr. Diet.*, **39** : 311-317.

MATUCHANSKY, C., VAHEDI, K., MORIN, M.C. et BOUHNIK, Y. 1999. Régime sans gluten et maladie cœliaque de l'adulte. *Gastroenterol Clin. Biol.*, **23** : 115-123.

OLIVES, J.P 2001. Nouvelles stratégies diagnostiques de la maladie coeliaque. Arch Pediatr 8(Suppl. 2) : 4034.

OMS. 1995. Utilisation et interpretation de l'anthropométrie. Série de rapports. *Ed. OMS*, Genève : 854 p.

ROLLAND-CACHERA, M. F., COLE, T. J. SEMPE, M. TICHET, J. ROSSIGNOL, C. and CHARRAUD, A. 1991. Body mass index variation : centiles from birth to 87 years. *Eur. J. Nutr.*, **45** : 13-21.

ROSTROM, A., MURRAY, J. A. and KAGNOFF, M. F. 2006. Technical review on the diagnosis and management of celiac disease gastroenterology. *American Gastroenterological Associate (AGA) Institute.*, **131** :1981-2002.

SANTE CANADA. 2007. La maladie cœliaque et l'innocuité de l'avoine. Position de Santé Canada sur l'introduction de l'avoine à l'alimentation des personnes ayant reçu un diagnostic de maladie cœliaque. Canada : 27 p.

SCHMITZ, J. 2007. Le régime sans gluten chez l'enfant. *Journal de pédiatrie et de puériculture*, **20** : 337-344.

SCHMITZ, J. et GARNIER-LENGLINE, H. 2008. Diagnostic de la maladie cœliaque en 2008. *Archives de pédiaterie*, **15** : 456-461.

SOUCI S. W., FACHMANN W. & KRAUT H. 1986. La composition des aliments. Tableaux des valeurs nutritives 1986/87. *Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart*, 1032 p.

TALAL, A. H., MURRAY J. A., GOEKEN J. A. and SIVITZ W. I. 1997. Celiac Disease in an Adult Population with Insulin-Dependent Diabetes Mellitus : Use of Endomysial Antibody Testing. *The American Journal Of Gastroenterology*,Vol 92, **8** : 1280-1284.

TKOUB, E. M. 2008. Maladie cœliaque de l'adulte. *Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique*, **48** : S27-S31.

TOLHI H. 2005. Maladie coeliaque : Prévalence et diététique associée dans la ville de Mila. Mémoire d'ingénieur, INATAA, Université Mentouri de Constantine : 42p.

VAHEDI, K. Y. and MATUCHANSKY, C. 2001. Maladie cœliaque de l'adulte. *Gastroentérol Clin. Biol.*, **25** : 485-494.

Production scientifique

BENATALLAH, Le., A. AGLI, et ZIDOUNE M. N. 2004. La maladie cœliaque : cas recensés de 1998 à 2003 et diététique associée a Jijel, Batna et Khenchela. *Colloque ADELF-EPIBIO : "L'Epidémiologie et la prise de décision en Santé Publique"*, Santé Publique & Sciences Sociales (**10**), Oran : 88-89.

BENATALLAH, Le., A. AGLI, et ZIDOUNE M. N. 2008. La maladie cœliaque dans l'Est Algérien (Guelma et Mila) : prévalence et aliments souhaités par les malades. Livret des proceeding, *Séminaire SIBA*, Alger, *Algérie.*

Partie 2 : FORMULATION SANS GLUTEN PROPOSEE

Sommaire Partie 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction..... 26
I. LES CEREALES…..... 26
I.1. Blé tendre et blé dur..... 26
I.1.1. Classification selon les utilisations..... 26
I.1.2. Propriétés physico-chimiques..... 28
I.2. Le riz..... 31
I.2.1. Classification selon types de riz..... 31
I.2.2. Propriétés physico-chimiques..... 32
II. LEGUMES SECS..... 34
II. 1. Classification 34
II. 2. Propriétés physico-chimiques..... 34
III. SUPPLEMENTATION CEREALES-LEGUMES SECS…..... 37

MATERIEL & METHODES

I. MATIERES PREMIERES..... 38
I.1. Semoule de blé dur & Farine de blé tendre..... 38
I.2. Ingrédients exempts de gluten..... 38
I.2.1. Le riz 38
I.2.2. Les légumes secs..... 38
I.3. Préparation et mouture des grains..... 39
II. FORMULATION SANS GLUTEN..... 39
III. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES PRODUITS DE MOUTURE..... 40
III.1. Teneurs en eau..... 40
III.2. Cendres totales..... 40
III.3. Protéines totales..... 41
III.4. Matières grasses totales..... 42
III.5. Granulométrie des farines et des semoules..... 43
IV. ANALYSE STATISTIQUE..... 43

RESULTATS & DISCUSSION

I. COMPOSITION DES MATIERES PREMIERES ET DES FORMULES..... 44
II. CARACTERISTIQUES GRANULOMETRIQUES..... 45
II.1. Cas des formules destinées à la fabrication du couscous sans gluten..... 45
II.2. Cas des formules destinées à la fabrication du pain sans gluten..... 46
III. ASPECT DES SEMOULES ET DES FORMULES DESTINEES A LA FABRICATION DU COUSCOUS..... 47

Conclusions..... 48
Références bibliographiques..... 49

Liste des tableaux

Tableau 10. Taux d'extraction moyen et taux de cendres des différents types de farines.... 27
Tableau 11. Principaux types de semoules fabriquées en Algérie..... 28
Tableau 12. Composition biochimique de farine de blé tendre ou de semoule de blé dur... 28
Tableau 13. Classification du riz selon sa longueur et le rapport longueur/largeur..... 32
Tableau 14. Principaux constituants biochimiques du riz blanchi..... 32
Tableau 15. Principaux composants biochimiques de la fèverole, du pois chiche et du pois protéagineux..... 34
Tableau 16. Diamètres moyens des grains de pois protéagineux, de fèverole et de pois chiche..... 39
Tableau 17. Principaux constituants des matières premières..... 44

Liste des figures

Figure 3. Schéma représentatif de l'organisation des régions cristallines et amorphes d'un grain d'amidon..... 29
Figure 4. Grains d'amidon de blé par microscopie optique (a), en lumière polarisée (b) et par microscopie à balayage électronique (c)..... 30
Figure 5. Diagramme de diffraction des rayons X pour des amidons de type cristallin A, B et C..... 31
Figure 6. Microscopie optique des grains d'amidon du riz (a), sous lumière polarisée (b) et par microscopie électronique (c)..... 33
Figure 7. Imagerie des grains d'amidon de fèverole, de pois chiche et de pois protéagineux. Microscopie optique (a), sous lumière polarisée (b) et par microscopie électronique (c)..... 35
Figure 8. Matières premières utilisées en panification et dans la fabrication des couscous sans gluten..... 39
Figure 9. Granulométrie des semoules destinées à la fabrication de couscous..... 45
Figure 10. Granulométrie des farines destinées à la panification 46
Figure 11. Aspect des grosses semoules individuelles et des formules qui en résultent..... 47

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
Partie 2

Introduction

La deuxième partie de cette thèse présente la formulation choisie pour lancer la fabrication de produits sans gluten d'imitation répondant en premier lieu au deux types d'aliments les plus revendiqués par la population cœliaque. Un aperçu bibliographique est donné sur le blé et le riz en tant que céréales ainsi que sur les trois légumes secs étudiés. Un rappel sur l'intérêt de la supplémentation céréales– légumes secs sera présenté. En méthodologie, les matières premières seront définies, le principe de la formulation donné et la caractérisation physico-chimique des produits de mouture élucidée. La partie résultats et discussion concernant les matières premières, les produits de mouture et les formules traitera essentiellement la composition chimique, la granulométrie, l'imagerie et les premiers avantages pouvant être tirés de la formulation envisagée.

I. LES CEREALES

I.1. Blé tendre et blé dur

On distingue deux espèces de blé : le blé tendre et le blé dur. Ils se différencient par la friabilité de l'amande, qui est plus importante pour le blé tendre et permet sa transformation en farine, alors que pour le blé dur la transformation se fait en semoules. Le blé tendre (*Triticum aestivum*) est utilisé pour la panification, la pâtisserie, la biscuiterie. Il est panifiable. Le blé dur (*Triticum durum*) est utilisé pour le roulage de couscous, la fabrication de galette, de certains pains traditionnels et de pâtes alimentaires. Il est pastifiable et panifiable (CALVEL 1984).

I.1.1. Classification selon utilisations

Selon la FAO 1995b, les semoules de blé dur sont d'une granulométrie supérieure ou égale à 212 µm. Pour les farines de blé tendre, celles-ci doivent passer au travers d'un tamis de 212 µm (FAO 1995a). Ce sont respectivement les amandes farineuses du blé tendre et vitreuses du blé dur qui donneront la farine et la semoule.

Les différents types de farines sont déterminés d'après le taux de cendres (Tableau 10). Plus le taux de cendres est faible plus la farine est pure et blanche, car les matières minérales sont surtout présentes dans le son. Le type 55 est le plus couramment utilisé en panification (CALVEL 1984).

Tableau 10. Taux d'extraction moyen et taux de cendres des différents types de farines (CALVEL 1984)

Types	Taux de Cendres	Taux moyen d'extraction	Utilisation
45	moins de 0,50	67	Pâtisserie
55	de 0,50 à 0,60	75	Pain ordinaire
65	de 0,62 à 0,75	78	Pains spéciaux
80	de 0,75 à 0,90	80-85	Pains spéciaux
110	de 1,00 à 1,20	85-90	Pain bis
150	plus de 1,40	90-98	Pain complet

Pour les semoules, leur classification est fonction de leur provenance au niveau du grain de blé dur et de leur granulométrie (APFELBAUM *et al.* 1981 ; ABECASSIS 1991) :

- **La semoule supérieure :** Elle provient de la partie centrale de l'amande de grain de blé dur et a un faible taux de matières minérales. Elle sert à fabriquer les pâtes alimentaires dites "*supérieures*".
- **La semoule courante :** Elle contient plus de parties périphériques et a un plus fort taux de matières minérales. Elle sert à la fabrication de pâtes dites "*courantes*".

D'autres types de semoules dont la granulométrie est comprise entre 1120 et 1250 µm existent dans le commerce. Dans le tableau 11, sont données les principales semoules fabriquées en Algérie et en France en fonction de leur granulométrie.

Tableau 11. Principaux types de semoules fabriquées en Algérie (BENBELKACEM *et al.*1995) et en France (ABECASSIS 1991)

Type de semoule	Granulométrie	Utilisations
En Algérie :		
Semoule Extra (SE)	90% de refus au tamis N° 120	Fabrication de pâtes alimentaires industrielles
Semoule Moyenne (SM)	90% de refus au tamis N° 100	Fabrication de couscous, galette, biscuits, crêpes et de couscous industriel de type moyen
Semoule Grosse (SG)	50% de refus au tamis N° 40 et N° 30	Fabrication de gros couscous
En France :		
3SE	180-500 µm	Fabrication de pâtes alimentaires de qualité supérieure
3SF	140-250 µm	Fabrication de pâtes alimentaires de qualité courante
MG	1120-1600 µm	Semoules vendues en l'état
3SG	710-1120 µm	
4S	450-710 µm	
5S	250-710 µm	

I.1.2. Propriétés physico-chimiques

La farine de blé tendre comme la semoule de blé dur, sont des composés complexes (Tableau 12), comportant différents constituants (protéines, lipides, sucres,...) qui jouent un rôle direct ou indirect soit dans la structuration et l'aération de la pâte en panification soit dans la fabrication de différentes pâtes alimentaires.

Tableau 12. Composition biochimique en g pour 100 g de farine de blé tendre (ATWELL 2001) ou de semoule de blé dur (SOUCI *et al.* 1994)

Constituants	Farine (ATWELL 2001)	Semoule (SOUCI 1994 FAVIER *et al.* 1995)
Eau	14	13,1
Protéines	7 - 15	9,56 – 12,6
Amidon	63 - 72	68,96 – 70,4
Polysaccharides non amylacés	4,5 - 5	3,9
Lipides	1 - 2	0,79 – 3,8

D'après GODON et WILLM (1991) ; FEILLET (2000), le germe du grain de blé est riche en lipides, protéines, vitamines et en éléments minéraux. Il représente environ 3% du grain. Il est éliminé à la mouture pour éviter le rancissement et augmenter la durée de

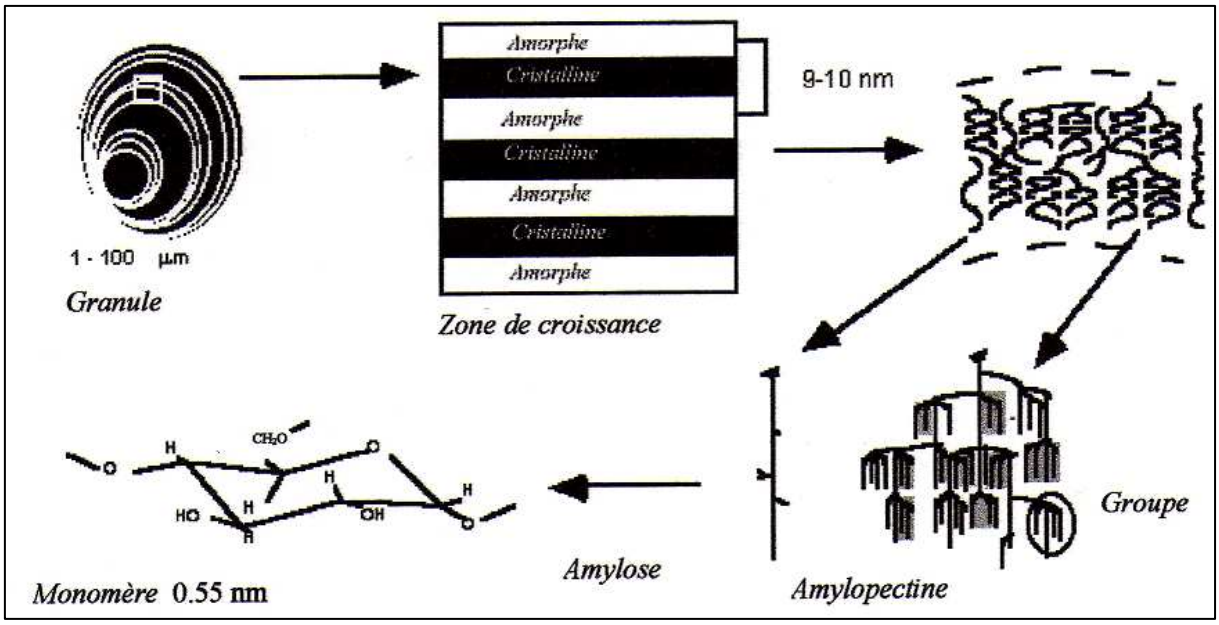


Figure 3. Schéma représentatif de la structure d'un grain d'amidon avec ses différents constituants (LELOUP *et al.* 1992)

conservation. Les enveloppes sont divisées en trois parties : le péricarpe, le tégument séminal et l'assise protéique, représentent 13 à 15% du grain. Le péricarpe et le tégument séminal sont essentiellement composés de cellulose, d'hémicellulose, de pentosanes et de matières minérales. L'assise protéique est riche en lipides (acide gras polyéthylénique (50 à 60% des acides gras insaturés), en protéines en faibles proportions, en matières minérales et en vitamines (0,6%). Les enveloppes sont éliminées pendant la mouture et deviennent les sons. L'amande ou albumen amylacé (82 à 85% du grain) est composée essentiellement d'amidon (63 à 72%) et de protéines (7 à 15%) (ADRIAN 1994)

Les protéines

Dans le blé, on distingue deux types de protéines, celles de structure (albumines 9 à 13%, globulines 6 à 8%) et celles de réserve (gluténines 40 à 50%, gliadines 30 à 40%). Les gliadines et les gluténines forment le réseau de gluten dont le comportement affecte considérablement les propriétés rhéologiques des pâtes (BLOKSMA 1990). D'après DACOSTA (1986), les propriétés fonctionnelles du gluten sont liées à la gliadine pour l'extensibilité et aux gluténines pour l'élasticité.

– ***Les gliadines*** sont des protéines monomériques associées par des liaisons hydrogène et des interactions hydrophobes.

Les gluténines sont des agrégats de monomères de haut poids moléculaire, liés par des liaisons hydrogène, des interactions hydrophobes et des ponts disulfures intermoléculaires.

L'amidon

L'amidon est un matériel composite constitué d'une fraction glucidique (98 à 99%) et d'une fraction non glucidique mineure (<1%) (COLONNA *et al.* 1995). Cette dernière se compose essentiellement de lipides, de protéines et de phosphore (LIN et CZUCHAJOWSKA 1998). Bien que présents en minorité, ces composés influent directement sur les propriétés physico-chimiques des amidons (ELIASSON et GUDMUNDSSON 1996). La fraction glucidique est constituée de deux polymères de structures différentes, l'amylose et l'amylopectine (ALAIS et LINDEN 1997) :

L'amylose : l'amylose (Figure 3) est une macromolécule linéaire constituée de D-anhydroglucopyranose reliés par des liaisons α-D-(1→4), répartis en plusieurs chaînes. L'une des extrémités de la chaîne porte un groupement pseudoaldéhydique réducteur (ALAIS et LINDEN 1997). A l'intérieur du grain d'amidon, l'amylose se présente de façon

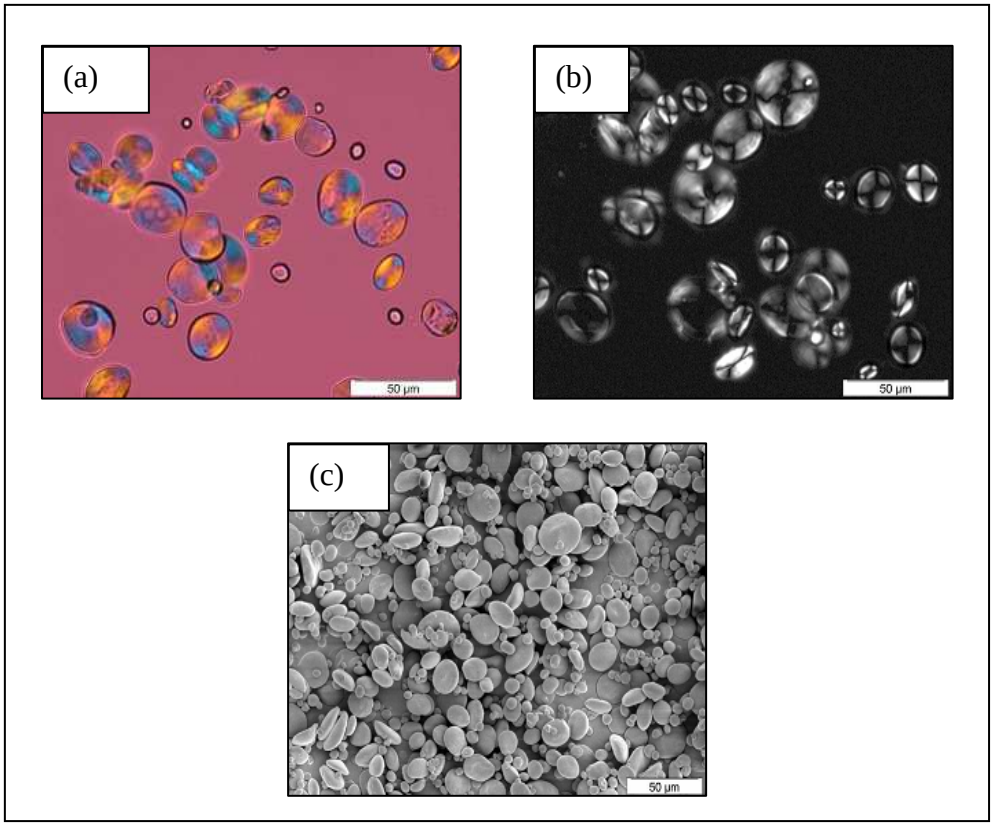


Figure 4. Grains d'amidon de blé par microscopie optique (a), en lumière polarisée (b) et par microscopie à balayage électronique (c) (CERMAV/CNRS/INRA 2007)

désordonnée contrairement à l'amylopectine qui est à l'origine de l'état cristallin (FRENCH 1984 ; HERMANSSON et SVEGMARK 1996).

- **L'amylopectine :** est un homopolymère ramifié (Figure 3) composé d'environ 10^6 unités de glucose par molécule (LEHNINGER 1977). Sa structure arborescente est obtenue par l'association de résidus de D-anhydroglucopyranose reliés entre eux par une liaison α-(1→4) en chaîne linéaire. Sur celles-ci, d'autres chaînes linéaires sont greffées par des liaisons α-(1→6) (BORNET *et al.* 1991).
- **Constituants mineurs :** Malgré sa présence à l'état de traces (<0,1%) (LIM et SEIB 1993), le phosphore joue un rôle important dans les propriétés fonctionnelles des amidons où il se trouve sous trois formes majeures : monoesters de phosphates, phospholipides et phosphore inorganique (LIN et CZUCHAJOWSKA 1998). Alors que les monoesters augmentent la viscosité et la clarté des gels, les phospholipides les diminuent (JANE *et al.* 1996 ; KASEMSUWAN et JANE 1996).

L'amylose et l'amylopectine jouent chacun un rôle déterminant dans la fonctionnalité finale de l'amidon naturel et de ses dérivés : viscosité, résistance au cisaillement, gélatinisation, solubilité, pouvoir adhésif, ... Un lien a par exemple été établi entre de faibles teneurs en amylose, une viscosité à chaud élevée, une faible tenue de la viscosité à chaud et un faible pouvoir épaississant à froid de l'amidon de blé (MASSAUX *et al.* 2006).

Morphologie des grains d'amidon

ELIASSON et GUDMUNDSSON 1996, rappellent que les amidons diffèrent considérablement les uns des autres par leurs propriétés, leur forme, leur taille et leur composition chimique dépendant essentiellement de leur source botanique. L'amidon est fréquemment décrit comme un polymère semi-cristallin. Les grains d'amidon sont formés alternativement de régions cristallines et amorphes (Figure 3) décrivant une biréfringence (BANKS et GREENWOOD 1975 ; LELOUP *et al* 1992).

Au microscope optique, le grain d'amidon de blé présente deux populations. De gros grains lenticulaires dont le diamètre varie de 15 à 50 µm et des grains polyédriques plus petits avec un diamètre moyen inférieur à 10 µm (GALLIARD et BOWLER 1987 ; MASSAUX *et al.* 2006) (Figure 4a). En lumière polarisée, les grains d'amidon sont biréfringents et présentent une croix noire appelée "Croix de Malte" dont les branches se rejoignent au niveau du hile. Cette croix est due à l'orientation radiale des chaînes de polymères à l'intérieur des

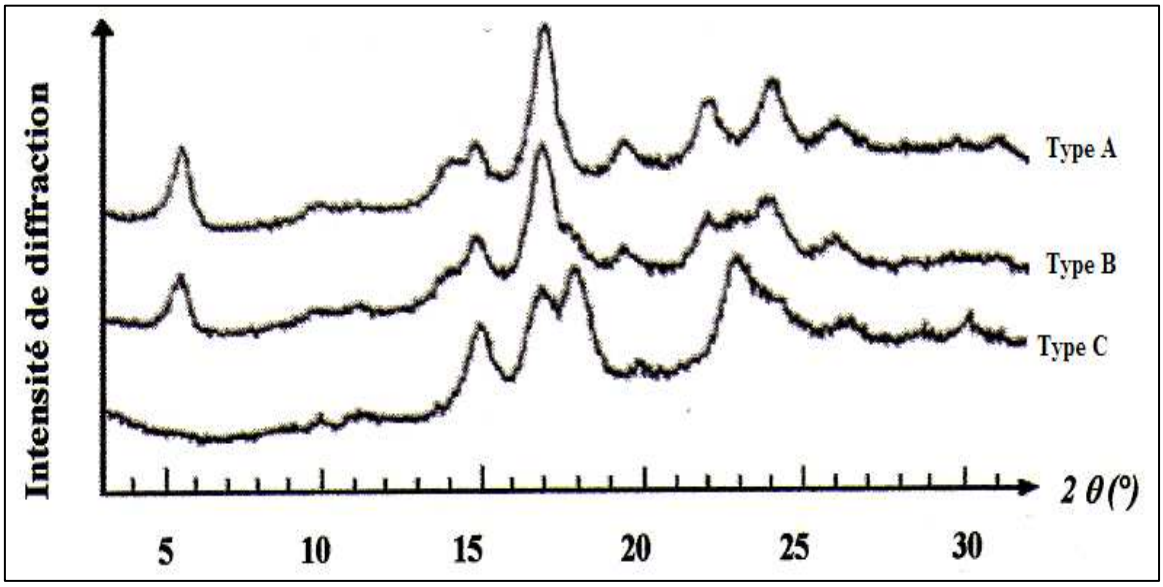


Figure 5. Diagramme de diffraction des rayons X pour des amidons de type cristallin A, B et C.

grains (Figure 4b). Les cristallites des grains d'amidon diffractent les rayons X en donnant trois diagrammes de diffraction différents de type A, B ou C (Figure 5). Les amidons de céréales tel que le blé et le riz, sont peu riches en amylose et se caractérisent par un spectre de diffraction des rayons X en général de type A (ZOBEL 1988 ; HIZUKURI 1996).

Les lipides

Les lipides représentent environ jusqu'à 3, 8% de la matière sèche de la farine ou de semoule de blé. En fonction de leur solubilité dans différents solvants, on distingue (MAC RITCHIE et GRAS 1973 ; CHUNG *et al.* 1978 ; OUNANE *et al.* 2006) :

- **Les lipides libres :** Il s'agit essentiellement des lipides apolaires qui sont des lipides de réserve du grain de blé (70% des lipides totaux). Ils sont composés de triacylglycérol, de faibles quantités de diacylglycérol, de monoacylglycérol et d'acides gras libres.
- **Les lipides liés :** Ils sont constitués essentiellement de lipides polaires qui sont des lipides de structure du grain de blé comprenant principalement les glycolipides et les phospholipides (environ 30% des lipides totaux).

Les polysaccharides non amylacés

Les pentosanes (ou hémicellulose) sont des polysaccharides non amylacés constitutifs des parois végétales (6 à 8% du grain et 2 à 3% de la farine). On les subdivise en fonction de leur solubilité dans l'eau froide en pentosanes solubles et insolubles. Ils se composent d'environ 67% des fibres du blé formés d'unités d'anhydropentoses dont 70% sont des arabinoxylanes (1/3 insolubles et 2/3 solubles) et les 30% restants par des arabinogalactanes (solubles) (FEILLET 2000).

I.2. Le riz

Le grain de riz (*Oryza sativa*) est plus petit que celui du blé. Il est latéralement aplatit, présente un petit point à la partie finale du germe et ne comporte pas de sillon (JULIANO 1994). Il a une amande dure et vitreuse (GODON et WILLM. 1991).

1.2.1. Classification selon types de riz

L'Institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) (JULIANO 1994) propose deux classifications du riz. La première selon la longueur du grain et la deuxième en fonction du rapport longueur/largeur de celui-ci (Tableau 13).

Tableau 13. Classification du riz selon sa longueur et le rapport longueur/largeur (JULIANO 1994)

	Classification du riz par sa longueur (mm)	**Classification du riz par sa longueur/largeur**
Extra long	> 7,5	-
Long	]6,61-7,50]	≥ 3,1
Moyen	]5,51 -6,61]	[2,1 – 3]
Court	< 5,50	≤ 2

Selon les traitements effectués sur les enveloppes des grains de riz, on distingue (JULIANO 1994 ; LE GOFF 1997) :

- *Le riz paddy :* C'est un riz qui n'a subit aucune opération technologique après sa récolte
- *Le riz cargo :* C'est un riz paddy débarrassé de ses balles plus ou moins adhérentes
- *Le riz blanchi :* Le riz *cargo* est transformé en riz blanchi enlèvement de la pellicule jaune –brun qui adhère fortement au grain. Il est aussi appelé riz *usiné.*

1.2.2. Propriétés physico-chimiques

Dans le tableau 14 est présentée la composition biochimique du riz blanchi cru.

Tableau 14. Principaux constituants biochimiques du riz blanchi cru (SOUCI *et al.* 1994 ; FAVIER *et al.* 1995)

Nutriments	**Teneur pour 100 g de matière sèche**
Protéines (g)	6,3 -7,1
Lipides (g)	0,3 – 0,5
Glucides (g)	77 - 89
Fibres (g)	0,2 – 0,5
Minéraux (g)	0,3 – 0,8

D'après JULIANO 1994, le germe du grain de riz est riche en corps protéiques contenant des globoïdes, en phytates et en lipides. Les enveloppes protectrices sont uniquement présentes dans le riz *paille* ou *paddy.* Celles-ci sont appelées *balle* et constituent environ 20% du poids du grain. Le riz *cargo* comprend les couches externes du péricarpe, le tégument et le nucelle, ainsi que le germe et l'albumen. L'amande ou albumen est constitué par des cellules minces contenant des granules d'amidon. La couche *subaleurone* est riche en protéines et en lipides

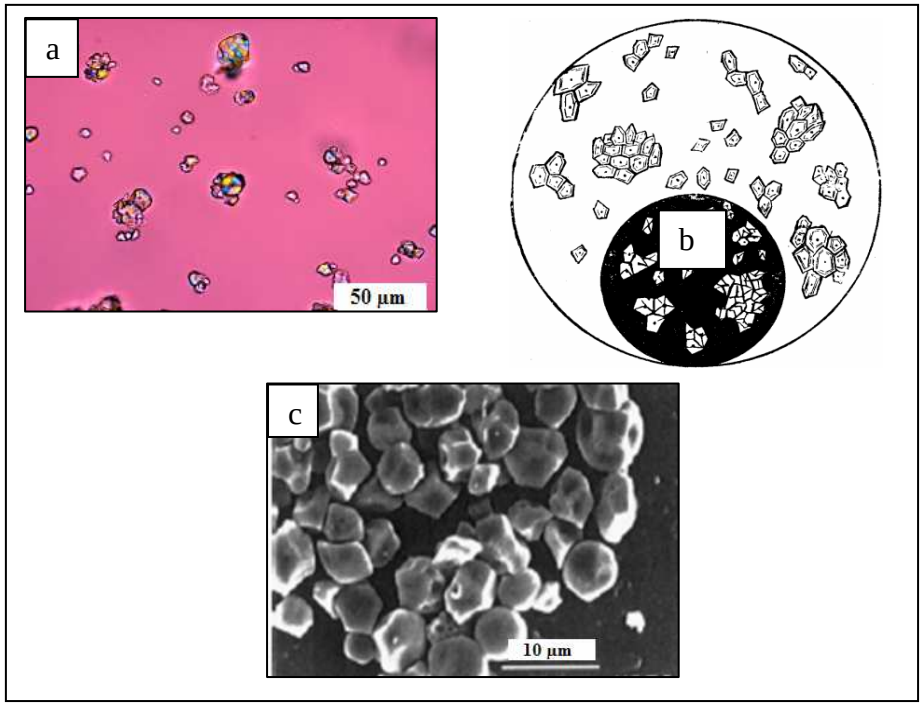


Figure 6. Microscopie optique des grains d'amidon du riz (a), sous lumière polarisée (b) et par microscopie électronique (c) (JULIANO 1994 ; SINGH *et al.* 2003 ; CERMAV/CNRS/INRA 2007).

Les protéines

Les protéines sont présentes dans tout l'albumen, localisés principalement sous forme de corps protéiques (JULIANO 1994). En ayant recours à l'extraction séquentielle des protéines, HUEBNER *et al*. 1990, ont obtenu la répartition moyenne suivante sur 33 échantillons : 9 pour cent de prolamines (solubles dans l'alcool), 7 pour cent d'albumine (soluble dans l'eau) plus globuline (soluble dans les solutions salées) et 84% de glutéline (solubles dans les alcalis). De toutes les céréales, c'est le riz qui a la plus faible teneur en protéines. Néanmoins, la teneur en lysine des protéines du riz varie de 3,5 à 4%, soit l'une des plus élevées parmi les protéines céréalières (JULIANO 1985 ; IRRI 1991).

L'amidon

Le riz est une bonne source d'énergie. Il contient 73% d'amidon souvent plus facile à digérer par les intestins fragiles que celui du blé, de pomme de terre ou de mais (KIGER et KIGER 1967 ; HO and YIP 2001 ; TAVAREZ *et al.* 1991). Il est recommandé aux malades présentant une fragilité intestinale (KIGER et KIGER 1967 ; GODON et WILLM 1991).

D'après JULIANO (1994), les grains d'amidon du riz sont de forme polyédriques et présentent une taille entre 3 et 9 µm (Figure 6), et ont une cristallinité de type A.

Les lipides

Les lipides du riz sont concentrés au niveau du germe et de l'assise protéique (KIGER et KIGER 1967 ; MOHTADJI- LAMBALLAIS 1989).

Les polysaccharides non amylacés

Les fibres végétales du riz se situent principalement dans les balles et le péricarpe. La plus grande partie des vitamines se trouve dans la couche à aleurone et dans le germe. Les sels minéraux sont localisés au niveau de l'assise protéique et dans le péricarpe (MOHTADJI-LAMBALLAIS 1989).

Les facteurs antinutritionnels

Les facteurs antinutritionnels dans le grain de riz sont concentrés dans la fraction constituant le son. Ils comprennent la phytine (phytate), l'inhibiteur de la trypsine, l'oryzacystatine et l'hémagglutinine (lectine) (JULIANO, 1985). Tous les facteurs

antinutritionnels sont des protéines et tous, à l'exception de la phytine sont sujets à dénaturation par la chaleur.

II. LES LEGUMES SECS

Il existe environ 80 espèces comestibles qui ont toujours fait partie des traditions culinaires (DUPIN *et al.* 1992 ; LE GOFF 1997). Ils se caractérisent par leurs teneurs peu élevées en lipides et leur richesse en amidon et en protéines (CUQ et LEYNAUD-ROUAUD, 1992 ; FAO/SMIAR 2001). Dans cette investigation, seuls les trois légumes secs utilisés en formulation sont développés : la fèverole, le pois chiche et le pois protéagineux.

II.1. Classification des légumes secs

La fèverole (*Vicia faba L.*) est une légumineuse appartenant à la famille des *Papilionacées* (KAYSI et MELCION 1992). Elle appartient à la variété *minor* dite aussi *equina*. Le moyen Orient (surtout l'Egypte) et le Maghreb en sont de gros consommateurs (BOYDELDIEU 1991).

Le pois chiche (*Cicer arietinum L.*) est une plante qui appartient à la famille des *Fabacées*. C'est la troisième légumineuse alimentaire cultivée dans le monde. En fonction des régions de culture, deux types de pois chiche apparaissent : *desi* et *cabuli* (DAUZAT *et al.* 1971 ; BOYDELDIEU 1991).

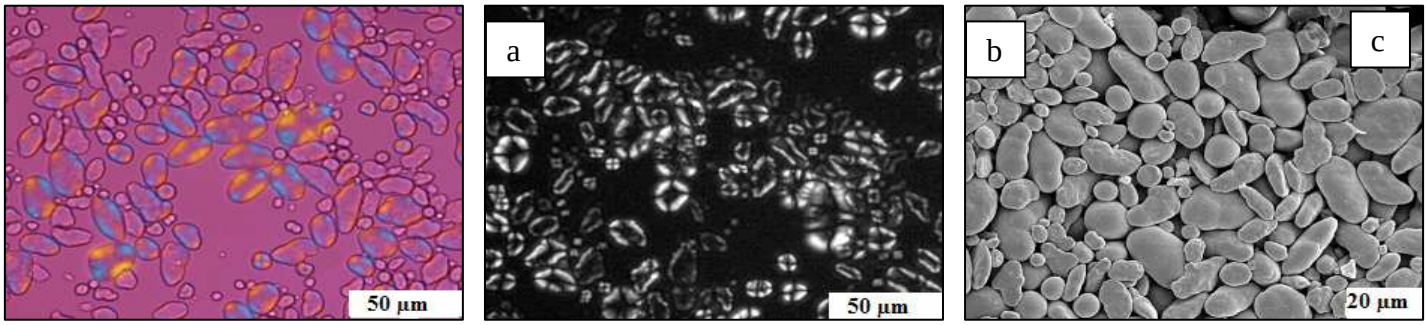
Le pois protéagineux (*Pisum sativum)* dit aussi pois sec ou pois cassé, appartient à la famille des *Fabacées*. Il est issu du pois potager (COUSIN 1996 ; PROLEA 2007b).

II.2. Propriétés physico-chimiques

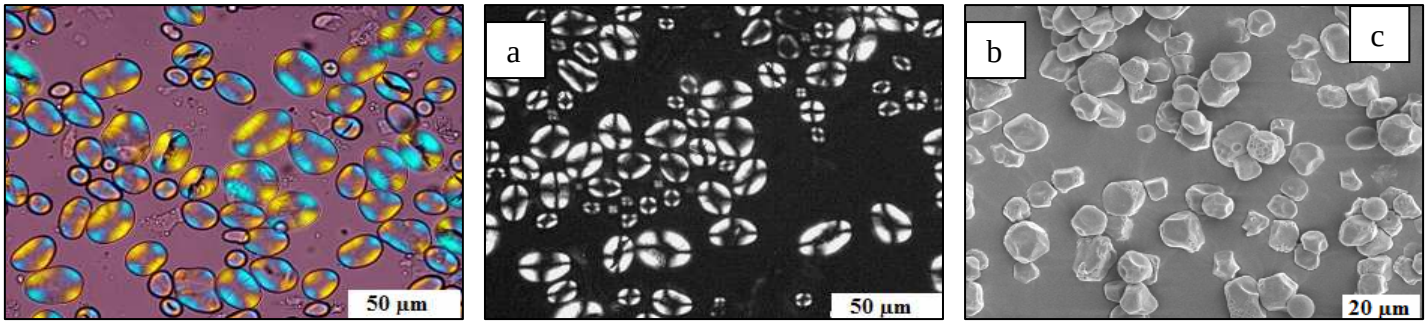
Dans le tableau suivant est donnée la composition biochimique moyenne de la fèverole, du pois chiche et du pois protéagineux.

Tableau 15. Principaux composants biochimiques de la fèverole, du pois chiche et du pois protéagineux en g pour 100g de matière sèche (FAO, 1982 ; BOYELDIEU, 1991 ; CUQ et LEYNAUD-ROUAUD, 1992 ; PROLEA 2007a, b)

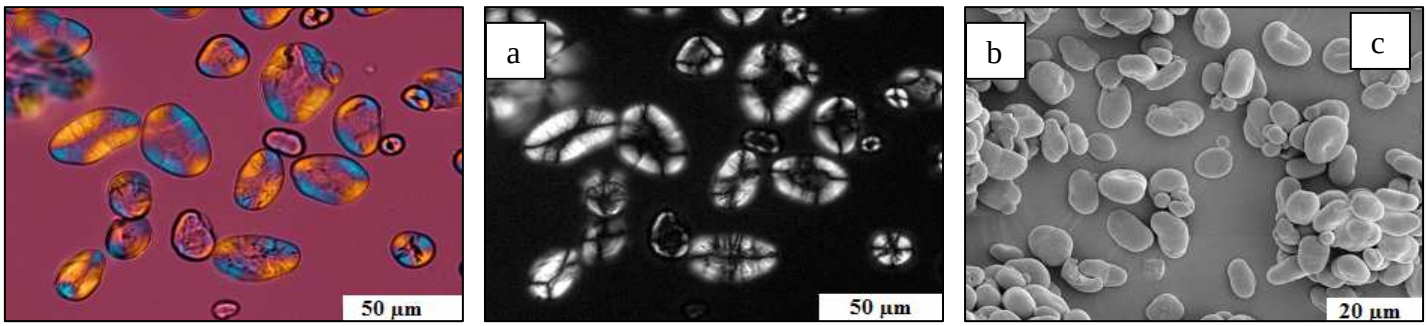
Nutriments	Fèverole	Pois chiche	Pois protéagineux
Protéines	27 - 31	19,4 - 20	25 – 27
Lipides	2	5 - 5,6	1,5 - 1,8
Glucides totaux	48,9 - 52	54,9-58	57 - 60
Minéraux	4 - 5	4	3,5
Fibres	10	12,4	6 - 8



Fèverole



Pois Chiche



Pois protéagineux

Figure 7. Imagerie des grains d'amidon de fèverole, de pois chiche et de pois protéagineux. Microscopie optique (a), sous lumière polarisée (b) et par microscopie électronique (c) (JULIANO 1994 ; SINGH *et al.* 2003 ; CERMAV/CNRS/INRA 2007).

Les protéines

Les protéines des légumineuses peuvent être distinguées en deux groupes : les protéines de réserve et les protéines ayant un rôle métabolique de défense. D'après CUQ et LEYNAUD-ROUAUD 1992, elles peuvent être classées en *albumines* (grains d'aleurone : 20% des protéines totales), en *globulines* contenant à leur tours les légumines et les vicilines (60 à 90% des protéines totales) et en *glutélines* (0% et 15% en fonction de l'espèce).

Les protéines des légumineuses ont un profil en acides aminés plutôt opposé à celui des céréales. Elles se caractérisent en général par des teneurs élevées en lysine et relativement faible en acides aminés soufrés (GUEGUEN et LEMARIE 1996). Cette déficience est plus marquée dans le cas du pois et de la fèverole que dans le cas du pois chiche (FAO, 1982).

L'amidon

Les légumineuses sont riches en amidon. Leur indice glycémique est inversement proportionnel à leur richesse en fibres (FAO 1982). Ceci leur confère un intérêt non négligeable dans le contrôle du poids et chez les diabétiques (diabète II) pour le contrôle de la glycémie (VENN and MANN 2004 ; NESTEL *et al.* 2004).

Alors que les amidons de la fèverole (Figure 7) sont allongés ou ovoïdes (10 à 50 µm), ceux du pois protéagineux sont réniformes ou ovoïdes (10 à 50 µm) et ceux du pois chiche sont polyédriques avec deux types de population : la première avec une taille < à 10 µm et la deuxième entre 10 et 50 µm. Les amidons des trois protéagineux étudiés sont de type cristallin C. Ils sont nettement moins riches en amylose que l'amidon de blé (67,2-68,4%) : le pois protéagineux (43-48%), la fèverole (30-43%). La teneur en amylose des amidons varie en fonction de l'origine botanique par ordre croissant comme suit : Fèverole avec 24%, Blé avec 26% et pois protéagineux avec 35% (DUPRAT *et al.* 1980 ; CERMAV/CNRS/INRA 2007).

Les lipides

Les légumes secs sont des aliments pauvres en lipides avec pour la plus part une teneur inférieure à 3% excepté le pois chiche (5,6%) (ZULET *et al.* 1999).

Les polysaccharides non amylacés

Les fibres des légumineuses qui se composent essentiellement de cellulose, de lignine et de pentosanes (CERNING *et al.* 1975) pour les fèveroles, se caractérisent par leur dureté et insolubilité. Elles font partie des composés pariétaux et se caractérisent par un fort pouvoir hygroscopique pouvant aller de 20 à 50 fois leur poids d'eau. (GLADE 1999 ; MARTINS *et al.* 2004 ; MICHELS *et al.* 2006).

Les autres constituants

Les teneurs en vitamines du groupe B des graines de légumineuses sont satisfaisantes et leur richesse en fer est diminuée par les problèmes de biodisponibilité (CUQ et LEYNAUD-ROUAUD 1992).

Les facteurs antinutritionnels

- Les principaux facteurs antinutritionnels qu'on trouve dans les légumes secs sont les tanins, les anti-minéraux, les facteurs antitrypsiques, les phyto-hémagglutinines ou léctines, les α-galactosides et les vicines et convicines. Les 1^{ers} sont à l'origine de la réduction de la vitesse de croissance et de l'efficacité alimentaire (CARRE et BRILLOUET 1986 ; GARRIDO *et al.* 1989), les $3^{èmes}$ d'hyperactivité et d'hypertrophie du pancréas (KAYSI et MELCION 1992), les $4^{èmes}$ d'agglutination des hématies du sang *in vitro*. (LIENER 1986), les $5^{èmes}$ de *favisme* qui est une anémie hémolytique (VILARIÑO 2006) et les $2^{èmes}$ et $4^{èmes}$ de flatulences (FAO 1982 ; KAYSI et MELCION 1992).

Mis à part les vicine, convicine et les α-galactosides qui sont thermostables (CERNING *et al.* 1975 ; MUDULI *et al.* 1982), la majorité de ces substances *antinutritionnelles* sont thermosensibles. La digestibilité des légumineuses serait liée à leur peau riche en fibres. Le pois protéagineux serait donc le plus digeste des légumineuses étudiées suivi de la fèverole puis du pois chiche. Par ailleurs, les traditions culinaires font que la peau de la fèverole est enlevée avant cuisson suite à un trempage dans l'eau au maximum d'une nuit (KAYSI et MELCION 1992). D'autres traitements tels que le traitement thermique sec ou humide, le broyage et le décorticage sont également utilisés (FAO 1982).

III- SUPPLEMENTATION CEREALES-LEGUMES SECS

Les traditions culinaires de la plupart des civilisations montrent que depuis l'antiquité les hommes ont empiriquement rééquilibré la valeur protéique d'une alimentation carencée en protéines animales en associant céréales et légumineuses : comme riz et lentilles en Inde ; pâtes et haricots en Italie ; blé et pois chiche dans le couscous au Maghreb ; maïs et haricots rouges en Amérique latine ; soja et riz en Chine ; mil et niébé ou pois de terre en Afrique noire ; blé, orge, seigle ou avoine et haricots secs, lentilles, fèves ou pois cassés en Europe ...etc (LAPPE 1982 ; FAO 1990).

L'équilibre en acides aminés apportés par cette supplémentation devra permettre une meilleure assimilation de ceux-ci par l'organisme. Pour une supplémentarité optimale, il faudrait consommer approximativement 65% de céréales et 35% de légumineuses (HULSE 1977 ; SIEGEL et FAWCETT 1978 ; FAO 1982).

MATERIEL & METHODES
Partie 2

Dans cette partie sont décrites d'une part les matières premières utilisées, leur préparation et leur fractionnement en farines et en semoules pour la formulation et la fabrication de pain et de couscous sans gluten et d'autre part les méthodes mises en œuvre pour leur caractérisation phisico-chimiques.

I. MATIERES PREMIERES

I.1. Semoule de blé dur et farine de blé tendre

La semoule de blé dur (*Triticum durum)* et la farine de blé tendre (*Triticum aestivum)* sont considérées comme les témoins auxquels sont comparés les autres matières premières. Il s'agit des matières premières classiquement utilisées pour la fabrication du couscous et du pain, respectivement et ce, en raison de leurs teneurs en gluten qui confèrent aux pâtes (couscous, pâtes alimentaires, pâte à pain ...) des propriétés technologiques et rhéologiques spécifiques.

La farine de blé tendre utilisée pour les essais de panification provenait d'un lot de mélange de farine commerciale de marque *KENZA*. Tous les essais ont été réalisés avec le même lot. La semoule utilisée pour la fabrication du couscous était de qualité « supérieure ». Issue de blés de mélanges. Elle a été fabriquée par l'ERIAD de Sétif. L'ensemble des essais sur le couscous ont été réalisé avec le même lot de semoule.

I.2. Ingrédients exempts de gluten

1.2.1. Le riz

Du riz long blanchi *(Oryza sativa japonica)* d'origine Thaïlandaise de variété *Basmati* à 2% d'humidité a été utilisé. Celui-ci a été acheté au super marché des Frères Tang, sous forme broyée et ensaché dans des sacs de 400 g.

I.2.2. Les légumes secs

Toutes les légumineuses utilisées dans cette investigation proviennent de l'Institut Technologique des Grandes Cultures I.T.G.C. de Guelma (Algérie) :

- ***Le pois chiche :*** (*Cicer arietinum*) appartient à la variété *FLIP-90-13C-G1* récolté en 2002 ;
- ***Le pois protéagineux :*** (*Pisum arvense*) appartient à la variété *MESSIRE G2* dont la récolte s'est faite en 2002 ;

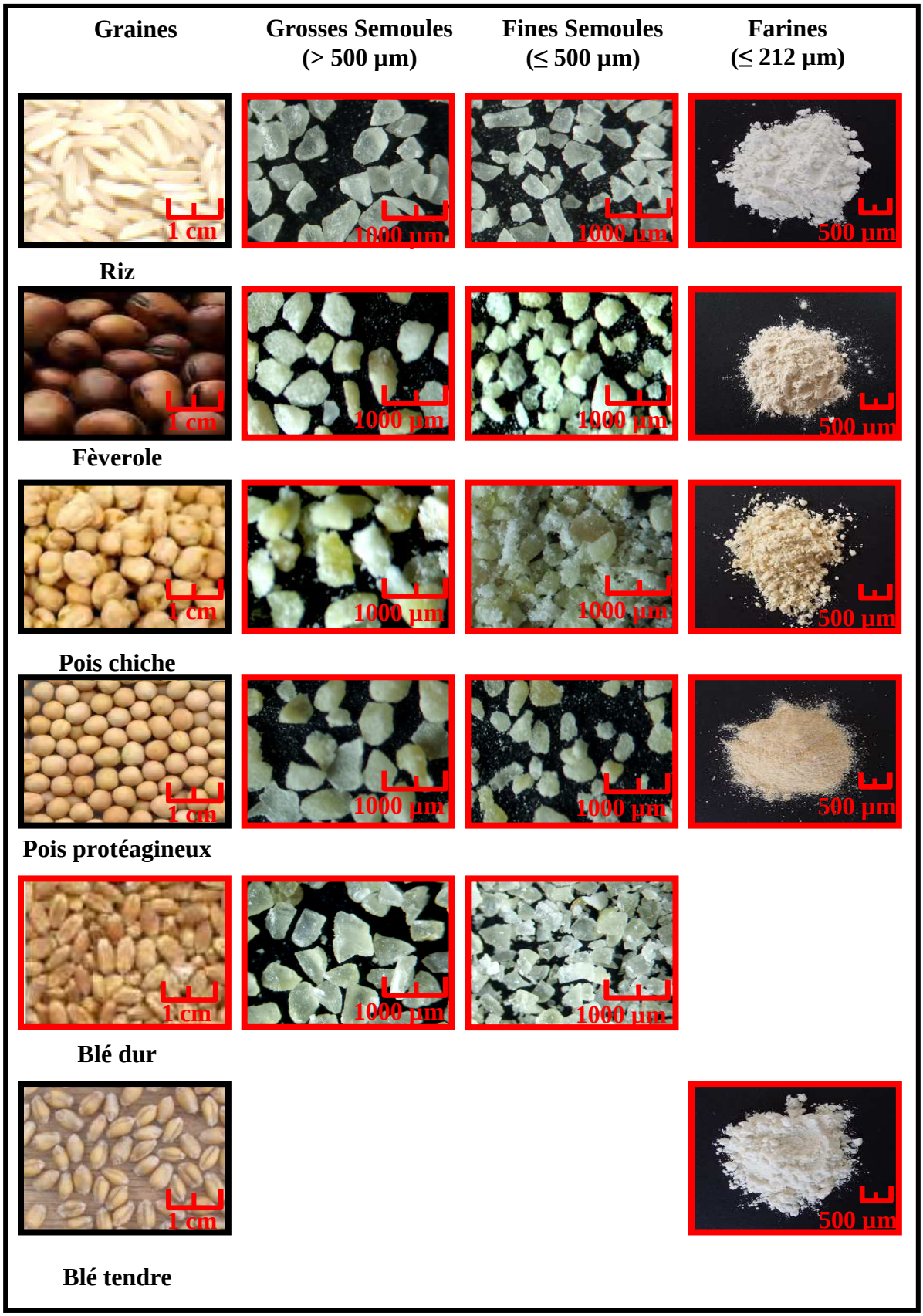


Figure 8. Matières premières utilisées en panification et dans la fabrication des couscous sans gluten.

- ***La fèverole :*** *(Vicia faba minor)* appartient à la variété *Sidi Aïch*, récoltée en 2001

Les matières premières utilisées en panification et pour la fabrication du couscous sont illustrées sur la figure 8. Les dimensions des graines des trois légumineuses étudiées sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Les mesures sont faites sur cinq lots de dix graines prises au hasard (Tableau 16).

Tableau 16. Dimensions moyennes des grains de pois protéagineux, de fèverole et de pois chiche

	Pois protéagineux (D)	**Fèverole (L)**	**Pois chiche (D)**
Diamètres (mm)	6,4 ± 0,8	7,2 ± 0,3	8 ± 0,1

D : Diamètre moyen, L : Longueur moyenne

I.3. Préparation et mouture des grains

La préparation des matières premières consiste d'abord à un triage manuel des graines dans le but d'éliminer celles endommagées, les pierres ainsi que les corps étrangers (cailloux, graines étrangères, débris de plantes, etc...).

La fèverole est préalablement dépelliculée, concassée et dégermée manuellement. Toutes les graines sont réduites en farine à l'aide d'un broyeur à meules de marque UMA Rouiba-Algérie de type MG E3. Après mouture, les produits obtenus sont stockés dans des sacs en fibres synthétiques dans un endroit frais et sec.

II. FORMULATION SANS GLUTEN

Pour la préparation des pains et des couscous sans gluten, une formule à base de riz et de légumes secs (fèverole, pois chiche ou pois protéagineux) a été proposée. Il est connu que le traitement de la maladie cœliaque réside dans un régime sans gluten. Il fallait donc présenter aux malades un aliment diététique (léger et nutritif) et appétant. D'un point de nutritionnel, la formule proposée est basée sur les avantages connus de la supplémentation céréales-légumes secs. Du côté technologique, les problèmes auxquels il fallait penser étaient essentiellement la faisabilité et l'acceptation des produits fabriqués par les consommateurs. En effet, l'utilisation de riz à lui seul donnerait des produits insipides et de couleur blanchâtre.

L'adjonction de légumes secs à la formule l'enrichirait en protéines et laisserait espérer de meilleures propriétés rhéologiques des pâtes sans gluten résultantes en vue d'une panification ou d'une fabrication de couscous.

La formule riz-légumes secs proposée est étudiée en comparaison avec la farine témoin de blé tendre en panification et avec la semoule de blé dur pour la fabrication de couscous. Dans cette formule, trois mélanges sont étudiés : Riz-Fèverole (FRF), Riz-Pois protéagineux (FRP) et Riz-Pois chiche (FRC).

Le mélange des produits de mouture de riz et de légumes secs se fait respectivement selon un rapport massique de 2/1. Les farines (< 212µm) sont destinés à la panification et les semoules (≥212µm) sont orientés vers la fabrication du couscous.

III. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES PRODUITS DE MOUTURE

III.1. Teneurs en eau

La teneur en eau est déterminée selon la norme AFNOR N.F. V03-707 de juin 1989 (AFNOR 1991). La dessiccation est effectuée sous un vide partiel dans une étuve isotherme de marque GALENKAMP. La prise d'essai est de 5 ± 0,001 g. Elle est séchée à 130°C pendant 2 heures environ sous une légère pression de 0,95 bar, jusqu'à obtention d'un poids constant de l'échantillon. Le taux en humidité (*K*) est exprimé en grammes pour 100 g de produit :

$$\mathbf{K = \frac{P_1}{P_0} \times 100}$$

Où : P_1 : Masse du résidu après séchage ; P_0 : Masse de la prise d'essai avant séchage.

Les grandeurs sont exprimées sur base humide. L'expression de la quantité sur base sèche se fait comme suit :

$$K \times \left[\frac{100}{100 - H} \right]$$

Où : K : Valeur sur base humide ; H : Humidité du produit.

III.2. Cendres totales

Les cendres totales sont obtenues par différence de pesée de l'échantillon avant et après incinération dans un four à moufle de marque HERAMS M110.

a. Cas de la farine de blé tendre, du riz et des légumes sec

La technique de dosage est celle décrite par LECOQ (1965a) pour la farine de blé tendre et par la norme AFNOR N.F. V03-760 de décembre 1984 (AFNOR 1991). Une prise d'essai de 3 ± 0,0001 g est incinérée dans un four à moufle à une température de 550 ± 10°C jusqu'à combustion complète de la matière organique et obtention d'une masse constante.

b. Cas de la semoule de blé dur

Les cendres totales sont obtenues selon la norme AFNOR N.F. V03-720 de décembre 1981 (AFNOR 1991). Les matières minérales sont obtenues par calcination complète des prises d'essais dans un four à moufle à 900 ± 25°C.

Le taux de cendres totales (C) est exprimé en grammes pour 100 g de produit humide :

$$C = \frac{P_1}{P_0} \times 100$$

Où : P_0 : Masse de la prise d'essai avant incinération ; P_1 : Masse de la prise d'essai après incinération

III.3. Protéines totales

La teneur en protéines totales est déterminée selon la norme AFNOR N.F. V03-050 de septembre 1970 (AFNOR 1991) par la méthode de KJELDAHL. Le coefficient de conversion de l'azote en protéines totales est de 5,70 pour la semoule de blé dur (FAO 1986a ; BARR 1995) ainsi que pour le riz et les légumes secs (BAR 1995) et de 6,25 pour les farines de blé tendre (AFNOR N.F. V03-050 de septembre 1970 (AFNOR 1991)).

Le principe consiste à minéraliser l'azote de la matière organique par de l'acide sulfurique concentré à chaud en présence d'un catalyseur. L'azote minéralisé se trouve alors sous forme de sulfate d'ammonium qui sera déplacé par la lessive de soude ; L'ammoniac produit est titré par de l'acide sulfurique 0,01 N. La méthode comporte essentiellement trois étapes :

a. Minéralisation

De l'acide sulfurique (96 %, d = 1,84) concentré et à chaud, oxyde et détruit la matière organique. L'azote organique se minéralise (AUDIGIE *et al.* 1984).

Matière organique + H_2SO_4 ⟶ $(NH_4)_2SO_4 + CO_2 + SO_2 + H_2O$

b. Distillation

L'ammoniac est déplacé de son sel par de la lessive de soude :

$(NH_4)_2SO_4 + 2NaOH$ ⟶ $Na_2SO_4 + NH_3 + 2H_2O$

L'ammoniac libéré est déplacé par les vapeurs d'eau de la distillation. Le distillat est récupéré dans un volume connu d'acide borique (4 %). Il se forme alors du borate d'ammonium.

c. Titration

L'ammoniac récupéré sous forme de borate d'ammonium est titré par de l'acide sulfurique 0,01 N en présence de l'indicateur coloré TASHIRO (LECOQ 1965b). Ce dernier est un mélange de bleu de méthylène et de rouge de méthyle. La titration s'achève au virage du milieu du vert au violet.

La teneur en azote total (A) est exprimée en grammes pour 100 g de matière humide :

$$A = \left[\frac{N \times 14 \times D \times V}{1000 \times Pe} \right] \times 100$$

Où : N : Normalité de l'acide titrant ; 14 : Masse d'un atome gramme d'azote ; V : Volume en ml de l'acide sulfurique utilisé pour la titration ; D : Coefficient de dilution de l'échantillon
Pe : Prise d'essai

III.4. Matières grasses totales

La teneur en matières grasses totales est déterminée selon la norme AFNOR N.F. V03-713 de février 1984 (AFNOR 1991). La mesure se fait en trois étapes :

1. Hydrolyse d'un échantillon de 8 g par de l'acide chlorhydrique (37,5 %) qu'on dilue en une proportion de 7/3 : acide/eau. L'opération se fait en présence d'éthanol et d'acide formique (80 %, d = 1,18). Les lipides liés aux protéines et aux glucides sont ainsi libérés. Le formate d'éthyle qui se forme est lui même solvant des lipides ;
2. Extraction de la matière libérée par de l'hexane ;

3. Elimination de l'hexane avec un évaporateur rotatif type ROTAVAPOR RV 05-ST et séchage du résidu à 60°C jusqu'à poids constant.

La teneur en matières grasses totales (MG) est exprimée en % de la masse d'échantillon initiale :

$$MG = \frac{P_1}{P_0} \times 100$$

Où : P_0 : Masse de la prise d'essai ; P1 : Masse du résidu lipidique

III.5. Granulométrie des farines et des semoules.

Les semoules destinées à la fabrication de couscous sont divisées en deux catégories en se référant au diagramme de fabrication :

→ Les semoules fines (<500 µm) : caractérisées par une batterie de tamis de 50, 100, 125, 160, 200 et 500 µm ;

→ Les grosses semoules (≥ 500 µm) : caractérisées par une batterie de tamis de 500, 630, 800 et 1000 µm.

Selon le CODEX STAN 152 de 1985, l'appellation *farine*, désigne tout broyat de granulométrie < 212 µm. Dans ce travail, les farines destinées à la panification sont passées à travers une batterie de tamis de : 200, 160, 100 et 50µm d'ouverture de mailles.

IV. ANALYSE STATISTIQUE

Concernant les résultats de cette partie, l'analyse statistique est effectuée par StatView 5ème version, (Abacus Concepts ™, Berkeley,USA) et par XLSTAT (version 7.5.2.). La comparaison entre plusieurs moyennes est effectuée par l'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur. Le test de Tukey/Kramer ou de Buferroni/Dunn sont utilisés pour la comparaison entre les groupes individuels de moyennes. La comparaison entre deux pourcentages à faibles effectifs présentés dans ce travail est réalisée par le test du Khi-Deux (SCHWARTZ 1993). Dans cette étude, le niveau de significativité est fixé à 0,05.

RESULTATS & DISCUSSION
Partie 2

I. COMPOSITION DES MATIERES PREMIERES ET DES FORMULES

Les mesures au laboratoire ont permis la mise en évidence de la composition physico-chimique des matières premières ayant servi aux fabrications de couscous et de pains sans gluten. Par ailleurs, l'estimation de la composition des formules est obtenue par calcul à partir des résultats d'analyses des ingrédients de base.

Dans le tableau 17 sont résumés les constituants majeurs de chaque ingrédient concerné par la fabrication du couscous et du pain ainsi que les niveaux calculés résultant de la supplémentation riz-légumes secs.

Tableau 17. Principaux constituants des matières premières (g pour 100g de matières premières)

(n = 6)	**Humidité**	**Protéines**	**Lipides**	**Cendres**	**Glucides totaux***	***Totaux***
Matières premières :						
Blé tendre	11,74 ± 0,08	10,10±0,21	0,21 ± 0,14	0,48 ± 0,15	77,47	***100***
Blé dur	14,73 ± 0,22	13,25 ± 2	0,33 ± 0,08	0,98 ± 0,14	70,71	***100***
Riz	13,15 ± 0,06	6,60 ± 0,16	0,56 ± 0,09	0,29 ± 0,08	79,4	***100***
Pois protéagineux	11,63 ± 0,18	22,35 ± 0,08	0,35 ± 0,15	2,79 ± 0,32	62,88	***100***
Pois Chiche	10,77 ± 0,11	24,88 ± 0,58	2,21 ± 0,25	3,44 ± 0,29	58,7	***100***
Fèverole	11,92 ± 0,61	30,90 ± 0,52	0,31 ± 0,03	2,43 ± 0,29	54,44	***100***
***Formules** ou couscous correspondants :*						
FRP	12,64 ± 0,05	11,85 ± 0,8	0,49 ± 0,05	1,12 ± 0,13	73,9	***100***
FRC	12,35 ± 0,05	12,70 ± 0,10	1,11 ± 0,11	1,34 ± 0,07	72,5	***100***
FRF	12,74 ± 0,19	14,70 ± 0,20	0,47 ± 0,06	1,00 ± 0,11	71,09	***100***

* Valeurs des glucides totaux obtenues par différence, ** Valeurs obtenues par calcul sur la base de 2/3 (p/p) riz et 1/3 (p/p) légumes secs, n : nombre d'essais, FRP : Formule riz-pois Protéagineux, FRC : Formule Riz-poisChiche, FRF : Formule Riz-Fèverole

Le riz qui est à la base de la formule proposée présente les plus faibles quantités en protéines (6,6%) des céréales étudiées. Concernant les légumes secs utilisés, ce sont les graines de fèverole qui sont les plus riches en protéines ($p < 0,0001$). Le calcul basé sur le rapport 2/1 utilisé dans ce travail montre une majoration et une amélioration dans le niveau en protéines des formules en rapport avec la présence de légumineuses dans celles-ci. Comme résultat de la supplémentation, toutes les formules étudiées semblent améliorer la balance en acides aminés et enrichir le contenu protéique des produits alimentaires fabriqués à base de riz

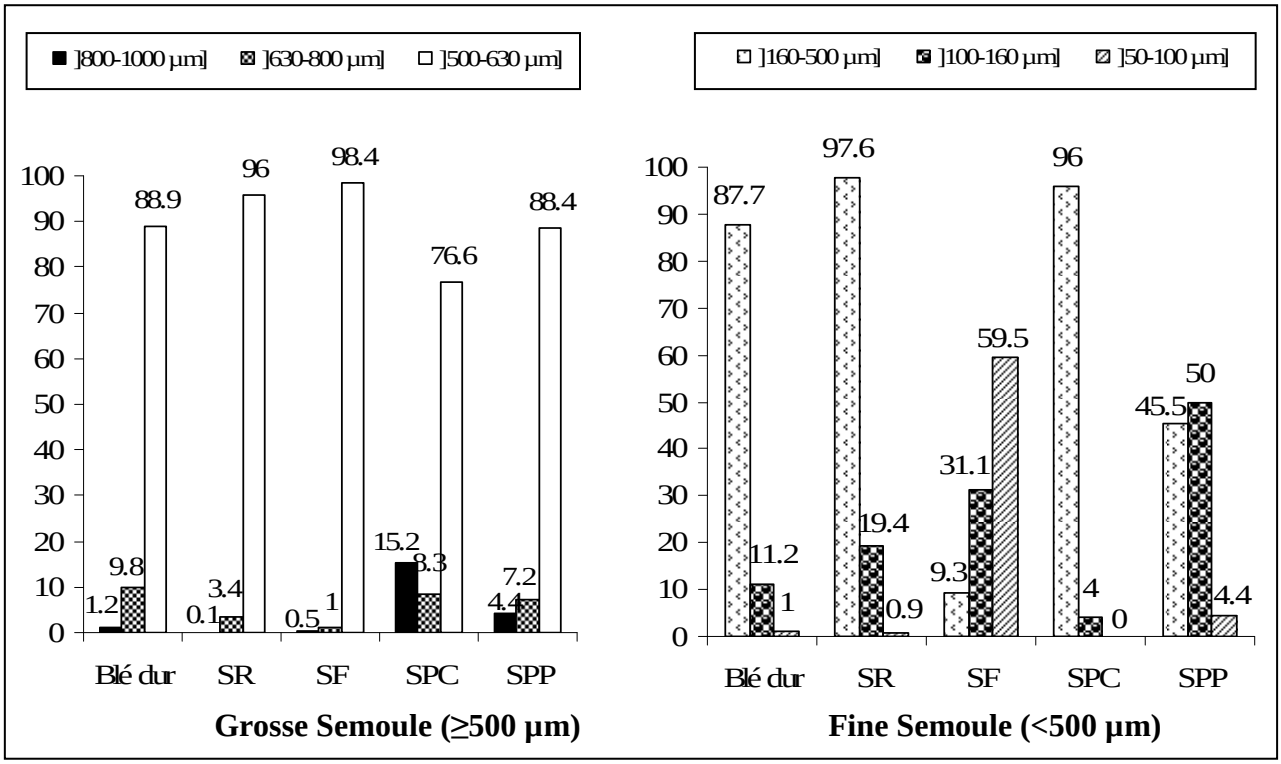


Figure 9. Granulométrie des semoules destinées à la fabrication de couscous : SR : Semoule de Riz, SF : Semoule de Fèverole, SPC : Semoule de Pois Chiche, SPP : Semoule de Pois Protéagineux

(couscous et pain) appuyant les résultats de HAMDAOUI *et al.* 1992, concernant la supplémentation du blé dur par du pois chiche à travers la consommation du couscous. Ces auteurs indiquent que les besoins en fer sont également améliorés suite à cette supplémentation. Dans cette investigation, c'est la formule RF qui semble offrir le plus de protéines avec 14,70%. Concernant la FRP et la FRC, aucune différence significative dans les taux en protéines n'est notée (11,85 et 12,70% respectivement).

Les cendres dans la FRP et la FRC semblent être légèrement supérieures FRF et ce probablement en raison de la présence des enveloppes connues pour leur richesse en minéraux. Le contenu en lipides semble quand à lui supérieur dans la formule à base de pois chiche (1,11%) où ce dernier en est l'ingrédient le plus riche (2,21%).

Par ailleurs, dans le cas de la fabrication du couscous, la composition des formules tel que calculées et montrées dans le tableau 17 devrait être revue en considérant le véritable rapport des deux types de semoules considérées (grosse et fine), agrégées dans le couscous final. Malgré ces différences dans ce rapport de distribution pouvant être également exprimé par le niveau de supplémentation dans le couscous final, la balance en acides aminés reste relativement intéressante. La quantification de cette distribution est nécessaire afin d'apprécier l'efficacité de la supplémentation pour chaque formule proposée ou couscous.

II. CARACTERISATIQUES GRANULOMETRIQUES

II.1. Cas des formules destinées à la fabrication du couscous sans gluten

La granulométrie de la fine (≤ 500 µm) et de la grosse semoule (> 500 µm) est estimée séparément avant formulation.

Plus de grosse semoule est notée pour le blé dur contre plus de fine semoule pour les produits de mouture de riz et de légumes secs (Figure 9). Cette différence semble être partiellement due au fait que les graines de légumineuses présentent d'une part une différence de friabilité et d'autre part qu'elles soient moulues dans un broyeur non pas à cylindres. Ce résultat est également un facteur très important pouvant influencer le niveau de faisabilité et par conséquent le rendement en couscous final. Il pourrait être intéressant dans de futures investigations d'étudier la faisabilité technologique en changeant ces proportions.

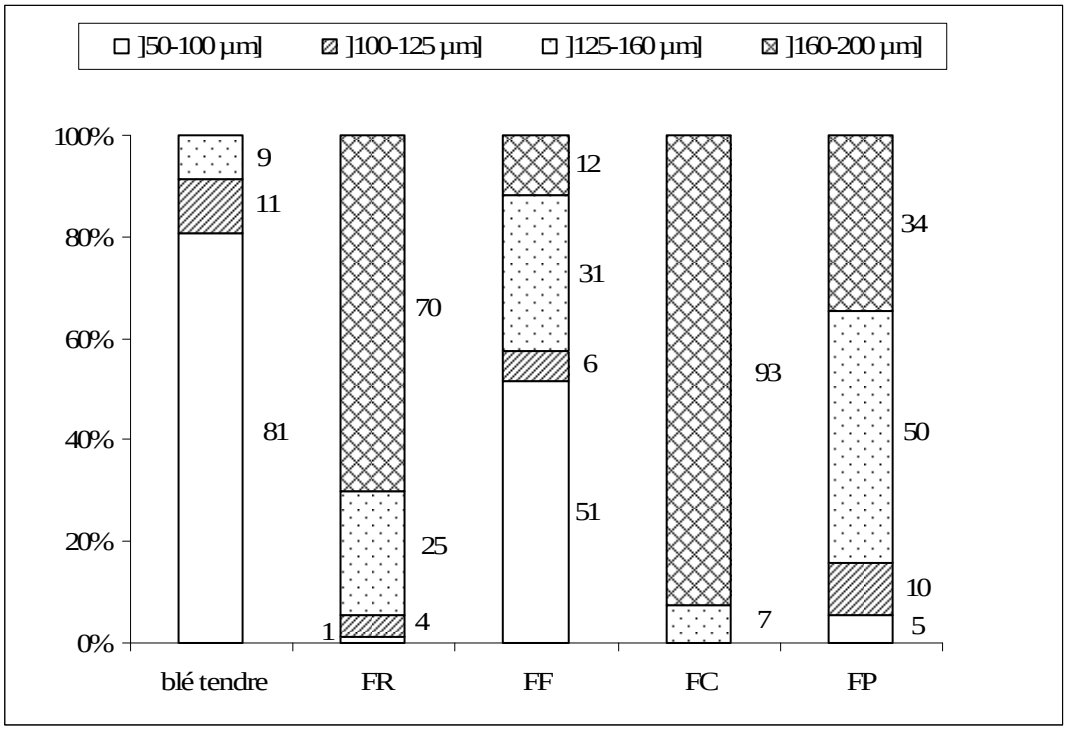


Figure 10. Granulométrie des farines destinées à la panification : FR : Farine de Riz, FF : Farine de Fèverole, FC : Farine de Pois Chiche, FP : Farine de Pois Protéagineux.

Dans cette étude, nous essayons de fabriquer du couscous à partir de produits moulus alors que leur distribution granulométrique diffère de celle d'une semoule ordinaire à base de blé dur. La figure 18 permet de déduire que la grosse semoule (>500) utilisée pour chaque matière première en début du diagramme de fabrication présente quelques différences dans la distribution de taille des particules. Par exemple, dans le large intervalle que définit la grosse semoule] 500-1000 µm], la majorité de la grosse fraction] 630-1000 µm] représente environ 11% dans le cas du pois protéagineux et de la semoule témoin de blé dur, 3,8 et seulement 1,5% pour le riz et la fèverole respectivement mais atteint plus que 23% dans le cas du pois chiche. Ces différences et celles concernant le rapport fine/grosse semoule (Fs/Gs) (cf. : bilan des matières et productivité), nécessaire pour une bonne agrégation mérite une étude plus complète et plus détaillée afin de contrôler l'effet du facteur granulométrie.

II.2. Cas des formules destinées à la fabrication du pain sans gluten

La granulométrie des farines destinées à la fabrication de pains sans gluten a également été élaborée avant formulation tel que pour les semoules orientées à la fabrication des couscous sans gluten (Figure 10). Alors que plus de grosses semoules sont notées pour le blé dur contre plus de fines semoules pour le riz et les légumes secs, d'avantage de fractions fines sont observées pour le blé tendre et la fèverole contre plus de grosses semoules pour les farines de riz, de pois chiche et de pois protéagineux.

C'est la farine de blé tendre qui montre le plus de fraction fine (81%) représentée par l'intervalle]50-100 µm]. La FF est le seul ingrédient de base qui offre une quantité conséquente de cette fraction (51%), restant toute fois inférieure à celle du témoin de blé tendre. Les autres farines se caractérisent par la prédominance de la fraction]160-200 µm] avec respectivement 93% pour la FC, suivie de la FR avec 70%, puis de la FP avec 34 % et enfin de la FF avec 12%.

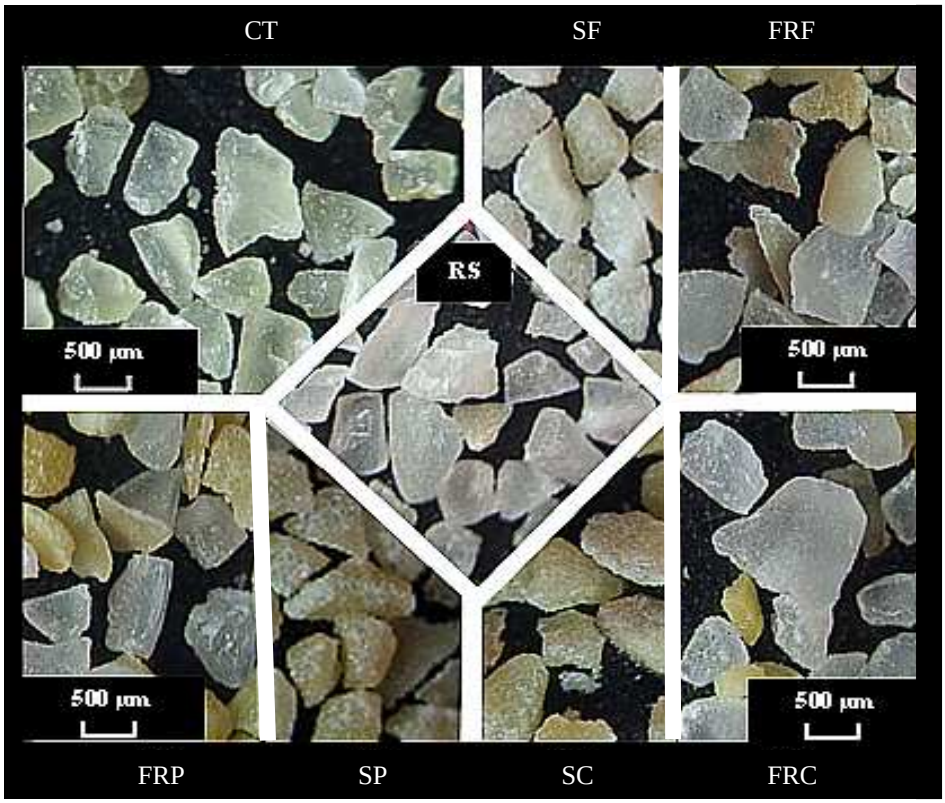


Figure 11. Aspect des grosses semoules individuelles et des formules qui en résultent. SB : Semoule de blé dur, SF : Semoule de Fèverole, SP : Semoule de Pois protéagineux, SPC : Semoule de Pois chiche, SR : Semoule de riz, FRF : Formule Riz-Fèverole, FRP : Formule Riz-Pois Protéagineux, FRC : Formule Riz-Pois Chiche.

III. ASPECT DES SEMOULES ET DES FORMULES DESTINEES A LA FABRICATION DU COUSCOUS

Les observations individuelles des grosses semoules et des formules qui en résultent utilisées en début du diagramme de fabrication sont montrées dans la figure 5. Alors que les semoules de blé dur et de riz montrent un aspect saillant et vitreux, les semoules de légumes secs semblent plus farineuses avec plus de bords ronds au niveau des fragments. Une coloration jaune intense est notée beaucoup plus dans le cas du pois chiche et du pois protéagineux que pour la fèverole. Au niveau des formules, nous pouvons observer la domination de la couleur blanche sur la jaune exprimant le rapport 2/1 utilisé dans la supplémentation riz-légumes secs (Figure 11).

Conclusions

En sus de l'équilibre en acides aminés visé, le calcul basé sur le rapport massique 2/1 utilisé pour la supplémentation des formules proposées montre une majoration de l'apport protéique en rapport avec la présence de légumes secs dans celles-ci. La formule RF semble offrir le plus de protéines (14,70%). Les deux autres, la FRP et la FRC, ont des taux en protéines très voisins (respectivement 11,85% et 12,70%) mais dans tous les cas plus intéressants que le riz seul (6,6%). L'ajout de farines ou semoules de légumes secs dans les trois formules a aussi apporté des corrections intéressantes de couleur en atténuant le blanc du riz. A ces avantages de la supplémentation s'ajouteraient des effets et interactions liés aux propriétés techno-fonctionnelles des composants de chacun des ingrédients. Ces interactions méritent d'être étudiées et testées en vue de situer la faisabilité pour une fabrication donnée. Ceci est l'objet des deux parties suivantes qui visent deux des fabrications les plus recherchées par les intolérants au gluten.

Références bibliographiques

ABECASSIS, J. 1995. La mouture du blé dur *In :* Les industries de première transformation. **GODON, B. et FRANGNE, R.** *Ed Tech & Doc,* Paris : 362-396.

ADRIAN, J. 1994. Composition et valeur nutritionnelle du pain *In :* GUINET, R. et GODON, B. Panification française. *Lavoisier Tech Doc* : 480-89.

ALAIS, C. et LINDEN, G. 1997. Biochimie alimentaire. ABREGES. *2ème édition, Masson,* 254 p.

APFELBAUM, M. FORRAT, C. et NILLUS, P. 1981. Diététique et nutrition. *Ed Masson,* Paris : 472 p.

ATWELL, W. A. 2001. Wheat flour. Eagan press, Minnesota, USA, 123 p.

BANKS, W. and GREENWOOD, C. T. 1975. Starch and its components. *Edinburgh University Press* : 45 p.

BENBELKACEM, A. SADLI, F. et BRINIS, L. 1995. La recherche pour la qualité des blés durs en Algérie *In :* La qualité du blé dur dans la région méditerranéenne. **DIPONZO, N. et KAANF NACHIT, M.** *Ed CIHEAM,* Espagne : 61-65.

BLOKSMA, A. H. 1990. Dough structure, dough rheology, and baking quality. *Cereal Foods World,* **35** : 237-244.

BORNET, F. R. J., FONTVIEILLE, A. M., RISKLLA, S. W., COLONNA, P., MERCIER ,C. and SLAMA, G. 1989. Insulin and glycemic response in healthy humansto native starch processed in different way ; correlation with in-vitro a amylaseydrolysis. *Am.J.Clin. Nutr,* **50** : 315-323.

BORNET, F., CLOAREC, D., GOUILLOUD, S., CHAMP, M., COLONNA, P.,BARRY, J. L. et GALMICHE, J. P. Amidons indigestibles : Digestibilité *in vitro* et aspects nutritionnels chez l'homme sain. *Gastroentérol. Clin. Biol.,* 14, 1991 : 90 – 103.

BOYDELDIEU, J. 1991. Produire des grains oléagineux et protéagineux. Lavoisier, technique et Documentation, Paris, 1991 : 234 p.

CALVEL, R. 1984. La boulangerie moderne. *Editions EYROLLES, 10 ème Édition,* Paris, 460 p.

CARRE, B., BRILLOUET, J. M. 1986. Yield and composition of cell wall residues isolated from various feedstuffs used for non-ruminant farm animal. *J. Sei. Food Agric*., **37** : 341-351.

CERMAV/CNRS/INRA. 2007. L'amidothèque, www.cermav.cnrs.fr

CERNING, J., SAPOSNIK, A. and GUILBOT, A. 1975. Carbohydrate composition of horse beans (*Vicia faba*) of different origins. *Cereal Chem.*, **52** :125-38.

CHUNG, O. K., POMERANZ, Y. and FINNEY, K. F. 1978. Wheat flour lipids in bread baking. *Cereal Chemistry,* **55** : 598-618.

COLONNA, P., BULEON, A., LELOUP, V., THIBAULT, J. F., RENARD, C., LAHAYE, M. et VIROBIEN, G. 1995. Constituants des céréales, des graines, des fruits et de leurs sous produits *In :* Nutrition des ruminants domestiques : Ingestion et digestion. *INRA Editions,* Paris : 83-116.

COUSIN, R. 1996. Le pois variabilité, objectifs de sélection. Sauve qui peut ! Le courrier de l'environnement de l'INRA, S8 : 13-17.

CUQ, J. L. et LEYNAUD-ROUAUD, C. 1992. Les graines de légumineuses *In :* **DUPIN, H., CUQ, J. L., MALEWIAK, M. L., LEYNAUD-ROUAUD, C. et BERTHIER, A. M.** Alimentation et nutrition humaines. *ESF éditeurs,* Paris : 941-61.

DACOSTA, Y. 1986. Le gluten de blé dur et ses applications. APRIA, Paris, 130 p.

DAUZAT, A., DUBOIS, J. et MITTERAND, H. 1971. *Nouveau dictionnaire étymologique et historique,* Librairie Larousse, France, 805 p.

DUPIN, H., CUQ, J. L., MALEWIAK, M. I., LEYNAUDROUAUD, C. et BERTHIER, A. M. 1992. Alimentation et nutrition humaines. ESF, Paris, 1553 p.

DUPRAT, F., GALLANT, D., GUILBOT, A., MERCIER, C. et ROBIN J. P. 1980. *L'amidon. In*: Les polymères végétaux. Ed. Gauthier B.M. Villars, Bordas : 176-231.

DURANTI, M. 2006. Grain legume protein and nutraceutical properties. *Fitoterapia*, **77** : 67-82.

ELIASSON, A. C., et GUDMUNDSSON, M. 1996. Starch : Physicochemical and functionnal aspects *In* : Carbohydrates in food. **ELIASSON, A. C.** New York : 431-503.

F.A.O. 1982. Les graines de légumineuses dans l'alimentation humaine. Etude FAO : Alimentation et nutrition. *2ème édition*, Rome, 152 p.

F.A.O. 1995a. Norme codex pour la farine de blé, *CODEX STAN 152-1985*, Rév. 1-1995 : 5 p.

F.A.O. 1995b. Norme codex pour la semoule et la farine de blé dur, *CODEX STAN 178-1991*, Rév. 1-1995 : 4 p.

FAO. 1990. Utilisation des aliments tropicaux- Céréales. Rome : 120 p.

FAO/SMIAR. 2001. Perspectives de l'alimentation. Bulletin N° 3, juin 2001, Rome : 5 p.

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

FEILLET, P. 2000. Le grain de blé, composition et utilisation. *Institut national de la recherche agronomique,* INRA, Paris : 308 p.

FRENCH, D. 1984. Organization of starch granules *In* : Starch chemistry and technology. *Whistler, R. L., BEMILLER, J. N. and Paschall, E. F. eds, Academic press,* New York, : 83 - 247.

GALLIARD, T. and BOWLER, P. 1987. Morphology and composition of starch *In :* GALLIARD, T. *(ed) Starch : Properties and Potential. John Wiley & Sons, Chichester* : 55-78.

GARRIDO, A., CABRERA, A., GOMEZ, A. and GUERRERO, J. E. 1989. Relationship between tannins content and "*in vitro*"; nutritive value in seeds of 24 strains in *Vicia faba L*. *In* : Recent advances of research in antinutritionnal factors in legume seeds. VAN DER POEL, I. E. *J. Huisman, TFB,* Liener eds. Pudoc Publ. Wageningen (NL) : 297 -300.

GLADE, M. J. 1999. Food, nutrition, and the prevention of cancer : a global perspective. American Institute for Cancer Research/World Cancer Research Fund, American Institute for Cancer Research, 1997. *Nutrition,* **6** : 523-6.

GODON, B. et WILLM, C. 1991. Les industries de première transformation des céréales. Technique et Documentation, Lavoisier, Paris : 679 p.

GUEGUEN, J. & LEMARIE, J. 1996. Composition, structure et propriétés physicochimiques des protéines de légumineuses et d'oléagineux. *In* : **GODON, B.** Protéines végétales, Paris, *Lavoisier Tech Doc* : 80-119.

HAMDAOUI, M., DOGHRI, T., and TRITAR, B. 1992. Bioavailability of Iron from a Traditional Tunisian Meal with Chickpeas Fed to Healthy Rats. *Ann. Nutr. Metab*. **36**, : 135-140.

HERMANSSON, A. M. and SVEGMARK, K. 1996. Development in the understanding of starch functionality. *Food Science and Technology,* **11** : 345-384.

HIZUKURI, S. 1996. Starch : Analytical aspects *In :* Carbohydrates in foods, **ELIASSON, A. C.,** New York : 347-430.

HULSE, J. H. 1977. Problems of nutritional pigeor pea chick pea and prospects of research *In :* Nutritional Standards and Methods of Evaluation for Food Legume Breeders. Prepared by the International Working Group on Nutritional Standards and Methods of Evaluation

for Food Legume Breeders. **HULSE, J. H., RACHIE, K; O. and BILLINGSLEY, L. W.** : 88-100.

HO, T. F. and YIP, W.C. 2001. Oral rehydration solution. Rice water is cheap and effective. *BMJ* November 3, 323 (7320) : 1068 p.

HO, T. F., YIP, W. C. Oral rehydration solution. Rice water is cheap and effective. *BMJ*. 323, 2001 : 1068 p.

HUEBNER, F. R., BIETZ, J. A., WEBB, B. D. and JULIANO, B. O. 1991. Rice cultivar identification by high-performance liquid chromatography of endosperm proteins. *Cereal. Chem.* **67** : 129 – 135.

IRRI. 1990. World rice statistics, Manilla : 320 p.

IRRI. 1991. *Program report for 1990.* Manille, IRRI : 320 p.

JANE, J. L., KASEMSUWAN, T., CHEN, J. F. and JULIANO, B. O. 1996. Phosphorus in rice and other starches. *Cereal Food World,* **41** : 827-838.

JULIANO, B. O. 1994. Le riz dans la nutrition humaine. Collection FAO : Alimentation et nutrition, **26**, IRRI (Institut International de Recherche sur le Riz), FAO, Rome: 180 p.

JULIANO, B.O. 1985. Rice: chemistry and technology. *2nd ed*. St Paul, MN, USA, A.A.C.C. : 774 p.

KASEMSUWAN, T. and JANE, J. 1996. Quantitative method for the survey of starch phosphate derivatives and starch phospholipids by 31p Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. *Cereal Chem.* **73** : 702 – 707.

KAYSI, Y et MELCION, J. P. 1992. Traitements technologiques des protéagineux pour le monogastrique : exemples d'application à la graine de fèverole.*INRA Prod. Anim.,* **1**, : 3-17.

KIGER, J. L. & KIGER, J. G. 1967. Techniques modernes de la pâtisserie -boulangerie industrielles et artisanales et des produits de régime. Tome 1. *Edition DUNOD*, Paris, France : 676 p.

LAPPE, F. M. Diet for a Small Planet. *10th anniversary edition, Ballantine Books*. New York, 1982 : 230 p.

LECOQ, R. 1965a. Manuel d'analyses alimentaires et d'expertises usuelles. Tome 1 (A à E). *Editions DOIN. DEREN et Cie, Paris* : 938 p.

LECOQ, R. 1965b Manuel d'analyses alimentaires et d'expertises usuelles. Tome 2 (F à Z). *Editions DOIN. DEREN et Cie, Paris* : 1246 p.

LE GOFF, L. 1997. Connaître ce que l'on mange. *In :* Encyclopédie de l'alimentation biologique et de l'équilibre nutritionnel. ROGER JOLLIOS, Paris : 675p.

LEHNINGER, A. L. 1977. Biochimie. Bases moléculaires de la structure et des fonctions cellulaires. *Flammarion Médecine Sciences, Seconde édition*, France : 1088 p.

LELOUP, V. M., COLONNA, P., RING, S. G., ROBERTS, K. and WELLS, B. 1992. Microstructure of amylase gels. *Carbohydr. Polym,* **18** : 189-197.

LIENER, I. E. 1986. Nutritional significance of lectins in the diet. *In :* The lectins : properties, functions and applications in biology and medicine. I. E. LIENER, N. SHARON and I.J. GOLSTEIN. *Eds*, Academic press Inc., London. 1986 : 527-552.

LIM, S. and SEIB, P. A. 1993. Preparation and pasting properties of wheat and corn starch phosphate. *Cereal. Chem.,* **2** : 137-144.

LIN, P. Y. and CZUCHAJOWSKA, Z. 1998. Role of phosphorus in viscosity, gelatinization and retrogradation of starch. *Cereal. Chem.,* **75** : 705-709.

MACRITCHIE, F. and GRAS, P. W. 1973. The role of flour lipids in baking. *Cereal Chemistry*, **50** : 292–302.

MARTINS, J.M., RIOTTOT, M., DE ABREU, M. C., LANÇA, M ; J., VIEGAS-CRESPO, A. M., ALMEIDA, J. A., FREIRE, J. B. and BENTO, O. P. 2004.

Dietary raw peas (*Pisum sativum L.*) reduce plasma total and LDL cholesterol and hepatic esterified cholesterol in intact and ileorectal anastomosed pigs fed cholesterol-rich diets. *J Nutr,* **34** : 3305-12.

MASSAUX, C., BODSON, B., LENARTZ, J., SINDIC, M., SINNAEVE, G., DARDENNE, P., FALISSE, A. et DEROANNE, C. 2006. L'amidon natif du grain de blé : Un composé naturel à valoriser par la connaissance de ses propriétés techno-fonctionnelles ? Livre Blanc « Céréales », Ed. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux et CRA-W, GEMBLOUX : 1-9 p.

MICHELS, K.B., GIOVANNUCCI, E., CHAN, A. T., SINGHANIA, R., FUCHS, C. S. and WILLETT, W. C. 2006. Fruit and vegetable consumption and colorectal adenomas in the Nurses' Health Study. *Cancer Res.*, 1 ; 66 (7) : 3942-53.

MOHTADJI-LAMBALLAIS, C. 1989. Les aliments. Editions Maloines, paris : 203 p.

MUDUULI DS., MARQUARDT RR., GUENTER W. 1982. Effect of dietary vicine and vitamin E supplementation on the productive performance of growing and laying chickens. *Br. J. Nutr,* **47 :** 53-60.

NESTEL, P., CEHUN, M., CHRONOPOULOS, A. 2004. Effects of long-term consumption and single meals of chickpeas on plasma glucose, insulin, and triacylglycerol concentrations. *Am J Clin Nutr,* 79 (3) : 390-5.

OUNANE, G., CUQ, B., ABECASSIS, J., YESLI, A. and OUNANE, S. M. 2006. Effect of physicochemical Charachteristics and Lipid Distribution in Algerian Durum Wheat Semolinas on the Technological Quality of Couscous. *Cereal Chem.* **83** : 377-384.

PROLEA. 2007a. La fèverole, de la plante à ses utilisations. Filière Française des huiles et protéines végétales. BR Fev 06/07, Paris : 6p.

PROLEA. 2007b. Protéagineux. Pourquoi le pois est-il une alternative durable au soja importé ? Infos Proléa. Nouvelle formule. Filière Française des huiles et protéines végétales. **68** : 2 p.

SCHWARTZ, D. 1993. Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. Flammarion Médecine Science, Paris : 306 p.

SIEGEL, A. et FAWCETT, B. 1978. Transformation et utilisation des légumineuses alimentaires (applications particulières aux pays en voie de développement). Centre de recherches pour le développement international. CRDI ? Ottawa, Ont., CA : 63p.

SINGH, N., SINGH, J., KAUR, L., SINGH, S. N. and SINGH, G. B. 2003. *Morphological, Thermal and Rheological Properties of Starches from Different Botanical Sources*. *Food Chemistry*, **81** : 219-231.

SOUCI S. W., FACHMANN W. & KRAUT H. 1986. La composition des aliments. Tableaux des valeurs nutritives Med pharm scientific publishers, *5ème édition*, *Stuttgart* : 1091 p.

TAVAREZ, L. A., GOMEZ, M. and MENDOZA, H. R. 1991. Management of acute diarrhoeal disease with rice water. *Arch Domin Pediatr*. **27** : 20-4.

VENN, B.J. and MANN, J.I. 2004. Cereal grains, legumes and diabetes. *Eur J Clin Nutr,* **58**, : 1443-61.

VILARIÑO, M. 2006. Quels effets des facteurs antinutritionnels (F.A.N.) sur la valeur nutritionnelle des fèveroles. La lettre d'information du Pôle Valeurs Nutritionnelles d'ARVALIS-Institut du Végétal. N° 10, ARVALIS-Institut du Végétal éditeurs : 2 p.

ZOBEL, H. F. 1988. Starch crystal transformations and their industrial importance. *Starch/Stärke,* **40** : 1-6.

ZULET, M.A., MACARULLA, M.T., PORTILLO, M. P., NOEL-SUBERVILLE, C., HIGUERET, P. and MARTINEZ, J. A. 1999. Lipid and glucose utilization in hypercholesterolemic rats fed a diet containing heated chickpea (*Cicer aretinum L.*) : a potential functional food. *Int. J. Vitam. Nutr. Res.,* **69** : 403-11.

Partie 3 : APTITUDE A LA FABRICATION DE COUSCOUS SANS GLUTEN

Sommaire Partie 3

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction..... 53
I. LE COUSCOUS 53
II. PROCESSUS DE FABRICATION DES COUSCOUS..... 54
II.1. description..... 54
II.1.1. Ustensiles de fabrication..... 54
II.1.2. Pré- cuisson de la semoule..... 56
II.1.3. Hydratation, granulation et roulage..... 56
II.1.4. Tamisage et calibrage..... 56
II.1.5. Cuisson a la vapeur..... 56
II.1.6. Séchage..... 57
II.2. Processus de fabrication du couscous à l'échelle macroscopique, microscopique et moléculaire..... 57
III. QUALITE DU COUSCOUS..... 58
III.1. Paramètres influençant la qualité du couscous..... 59
III.1.1. Matières premières..... 59
III.1.2. Composition biochimique des matières premières..... 59
III.1.3. Taille des particules..... 61
III.1.4. Processus de fabrication..... 62
III.2. Appréciation de la qualité culinaire du couscous..... 63
III.2.1. Appreciation instrumentale..... 63
III.2.2. Evaluation sensorielle..... 64

MATERIEL & METHODES

I. MATIERES IMPLIQUEES..... 65
I.1. L'eau d'hydratation..... 65
I.1.Le sel..... 65
II. MATERIEL TRADITIONNEL DE FABRICATION DE COUSCOUS..... 65
III. DIAGRAMME TRADITIONNEL DE FABRICATION..... 66
IV. MESURE DU VOLUME SPECIFIQUE DU COUSCOUS SEC..... 66
V. ESTIMATION DU RENDEMENT..... 66
VI. CARACTERISATION GRANULOMETRIQUE..... 67
VII. APPRECIATION DE LA QUALITE DU COUSCOUS..... 67
VII.1. Mesure de l'Indice de Gonflement (IG)..... 67
VII.2. Mesure du Degré de Désintégration (DD)..... 67
VII.3. Mesure de la Capacité d'Absorption d'eau (CA) et de l'Indice de prise en masse (IPM) 68
VIII. APPRECIATION DE LA MICROSTRUCTURE DU COUSCOUS..... 68
IX. EVALUATION SENSORIELLE DU COUSCOUS..... 68
X. ANALYSE STATISTIQUE..... 69

RESULTATS & DISCUSSION

I. MICROSTRUCTURE DES COUSCOUS FABRIQUES..... 70
I.1. Développement des agglomérats de couscous lors de la fabrication..... 70
I.2. Structure des agglomérats de couscous secs..... 70
II. GRANULOMETRIE ET VOLUMES SPECIFIQUES DES COUSCOUS..... 71
III. BILAN DE MATIERE ET RENDEMENT..... 72

IV. QUALITE DU COUSCOUS..... 73
IV.1. Indice de gonflement (IG) et Capacité d'Absorption d'eau (CA)..... 74
IV.2. Degré de désintégration (DD)..... 75
IV.3. Indice de prise en masse (IPM)..... 76
V. CARACTERISTIQUES SENSORIELLES DU COUSCOUS..... 76

Conclusions..... 78
Références bibliographiques..... 79
Production scientifique..... 81

Liste des tableaux

Tableau 18. Classification par ordre croissant des tamis utilisés dans la fabrication du couscous en Afrique du Nord et en Afrique de l'Ouest..... 55
Tableau 19. Descripteurs sensoriels décrivant la texture et l'aspect général des couscous sans gluten cuits, retenus pour le test de *Friedman*..... 69
Tableau 20. Masses volumiques des couscous fabriqués..... 72
Tableau 21. Bilan de matières des couscous fabriqués en accord avec le diagramme traditionnel..... 72

Liste des figures

Figure 12. Microphotographies de grains secs et hydratés de semoule, d'agglomérats secs et humides et grains finaux de couscous..... 58
Figure 13. Superposition des étapes de fabrication du couscous sur le diagramme d'état des composants de blé dur (amidon & protéines)..... 58
Figure 14. Microphotographies de farines, de couscous cru et cuit à la vapeur de sorgho SSV8 moulu par des procédures traditionnelles et mécaniques..... 62
Figure 15. Microphotographies d'échantillons de couscous..... 62
Figure 16. Microphotographies au Scanner électronique montrant la taille des particules et l'uniformité de la forme de différents couscous..... 63
Figure 17. Viscoélastographe de Chopin..... 63
Figure 18. Ustensiles de fabrication de couscous sans gluten..... 65
Figure 19. Diagramme traditionnel de préparation du couscous selon le mode de préparation dans le nord Est Algérien..... 66
Figure 20. Opérations de roulage le long des principales étapes du diagramme de fabrication des couscous..... 70
Figure 21. Aspect des couscous sans gluten comparés au témoin de blé dur..... 70
Figure 22. Distribution granulométrique des couscous sans gluten fabriqués..... 71
Figure 23. Indice de gonflement (IG) des CSG et du CT à 25°C et à 100°C..... 74
Figure 24. Désintégration des CSG et du CT dans de l'eau à 25°C..... 75
Figure 25. Indice de Prise en Masse (IPM) des CSG et du CT..... 76
Figure 26. Classification par rang de *Friedman* de différents couscous fabriqués..... 76

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
Partie 3

Introduction

Au niveau de cette partie, l'aptitude à la fabrication de couscous sans gluten est approchée. Des données bibliographiques permettront de définir le couscous puis une comparaison des processus de fabrication artisanaux de couscous sera abordée pour terminer par quelques précisions sur la qualité du couscous. En méthodologie, seront décrits principalement le diagramme de fabrication de couscous utilisé, les moyens de caractérisation physiques, et d'appréciation de la qualité du couscous. Les résultats exposeront des images montrant la microstructure des couscous fabriqués, les bilans de matière et rendements enregistrés pour les trois formules et les caractéristiques physiques et sensorielles des couscous fabriqués.

I. LE COUSCOUS

Le couscous est le dominateur commun des peuples Africains. C'est le symbole de leur authenticité, l'origine de leur fierté et de la perpétuation de leur civilisation. L'appellation *Couscous* s'applique à tout produit composé de semoule de blé dur (*Triticum durum*) dont les particules sont agglomérées en ajoutant de l'eau potable et qui a été soumis à des traitements physiques tels que la cuisson et le séchage. Le couscous est préparé à partir d'un mélange de semoule grosse (70%) et de semoule fine (30%). Il peut être aussi préparé à partir de semoule dite "grosse-moyenne" (FAO 1995). Selon la même référence, la dénomination *Couscous* peut être attribuée à des produits destinés aux mêmes usages mais préparés à partir d'autres céréales que le blé dur, à condition que cette appellation soit immédiatement suivie d'une spécification des céréales utilisées.

Dans les pays du Maghreb, le couscous le plus courant est sous forme de petits grains fabriqués à base de blé dur cependant, d'autres variantes existent telles que le couscous à gros grain à base de blé dur "*Aïch*" ou "*M'hammes*", le couscous à base de blé fermenté "*Machroub*" appelé "*Meziet*" dans le Constantinois et le couscous à base d'orge dénommé "*maghlout*". En Tunisie, cette même dénomination décrit le *couscous farina* qui est fabriqué à base de blé tendre (*Triticum aestivum*) (KAUP et WALKER, 1986).

La fabrication du couscous est passée de l'échelle artisanale à l'échelle semi-industrielle ou industrielle dans de nombreux pays de l'Afrique du Nord (Tunisie, Algérie et Maroc) (KAUP et WALKER, 1986).Elle est en cours d'industrialisation dans certains pays de l'Afrique de l'Ouest (ALUKA *et al.* 1985). Dans ce qui suit, uniquement à la fabrication du couscous artisanal sera abordée.

II. PROCESSUS DE FABRICATION DES COUSCOUS

II.1. Description

Chaque pays, voir chaque région, a son propre procédé de fabrication de couscous. Alors que la majorité des pays de l'Afrique de l'Ouest fabriquent et consomment traditionnellement du couscous fermenté à flaveur acide à partir d'autres céréales que le blé [sorgho (*Sorghum bicolore*), millet perlé (*Pennisetum americanum*), maïs (*Zea mays*) ou fonio (*Digitaria exilis*)] (GALIBA *et al.* 1987)], en Afrique du Nord, on le consomme essentiellement non fermenté à base de blé dur et d'orge (ABOUBACAR and HAMAKER, 1999).

Les processus de fabrication du couscous Algérien, Tunisien et Marocain se ressemblent beaucoup. Les principales étapes de fabrication qui sont communes pour ces pays se résument en un mélange de grosse et de fine semoules avec une solution d'eau salée. Les agglomérats formés sont roulés puis mis en forme par des tamis, cuits à la vapeur et séchés à température ambiante. Le produit final est séparé en couscous gros, moyen et fin (KAUP and WALKER, 1986 ; GALIBA *et al.,* 1987; YOUSFI 2002 ; BAHCHACHI, 2002 ; DEROUICHE, 2003). Par ailleurs, d'un pays à un autre, des variantes apparaissent au niveau du diagramme général de fabrication du couscous telle que l'étape de pré cuisson et séchage des matières premières (grosse semoule) avant l'amorce de la fabrication, le nombre de tamis utilisés lors du processus ainsi que leurs ouvertures de mailles (KAUP and WALKER, 1986).

II.1.1. Ustensiles de fabrication

Les ustensiles de malaxage

Alors que les récipients de préparation de couscous en Afrique du Nord sont en bois issus de troncs d'arbre appelés *Guessâa* (YOUSFI 2002 ; BAHCHACHI, 2002 ; DEROUICHE, 2003), ceux utilisés en Afrique de l'Ouest sont des fruits de cucurbitacées en bois appelés *calebasses*, pouvant atteindre jusqu'à 40 cm de diamètre (N'DIR et GNING 1989).

Les Tamis

Qu'il s'agisse d'Afrique de l'Ouest ou d'Afrique du Nord, la différence réside essentiellement dans le nombre de tamis utilisés dans chaque diagramme de fabrication, leur ordre chronologique d'utilisation, leurs ouvertures de mailles et leurs appellations (Tableau 18).

Tableau. 18 Classification par ordre croissant des tamis utilisés dans la fabrication du couscous en Afrique du Nord et en Afrique de l'Ouest

Tamis	***Rôle dans le diagramme***	***Ouvertures de mailles (µm)***						
		Afrique du Nord				***Afrique de l'Ouest***		
		a	***b***	***c***	***d***	***e***	***f***	***g***
Autres Tamis	*Séparer les farines de blé des semoules**	-	280	-	-	-	-	-
Dekkak ou *Azzel*	Séparer la grosse semoule "*fetla*"de la fine "*d'kak*"	80	-	*ND*	-	-	-	-
El Berram ou *Semmad*	Séparer après roulage le couscous des particules non roulées	100	-	-	-	-	-	-
Mesfouff	Séparer le gros et moyen couscous d'un plus fin appelé *Mesfouff*	-	525	525	-	-	-	-
Reffad	Séparer le couscous des grains trop fins ou non roulés	600	1110/ 1610*	800	1600	1000	-	1500
Meaâoudi	Calibrage plus fin du couscous	800	-	1110	2290	-	2000	-
Sekkat ou *Kherredj*	1er calibrage des graines roulées	1000	-	1140	2800	-	2500	2500

*Tamis utilisés uniquement dans le Sud Algérien, *ND* : Tamis utilisés par l'auteur mais non définis, - : Tamis non utilisés par l'auteur dans le diagramme de fabrication ; Quelques villes de l'Est et du Sud Algérien (BAHCHACHI[a] 2002 ; YOUSFI[b] 2002 ; DEROUCHE[c] 2003) et en Tunisie (KAUP and WALKER[d] 1986) ; En Afrique de l'Ouest : (VODOUHE[e], 1998 ; ALUKA[f] *et al.*, 1985 ; GALIBA[g] *et al.*, 1987).

La comparaison des différents tamis utilisés au cours de la fabrication des couscous dans le tableau ci-dessus montre que les couscous du Sud de l'Algérie et de Tunisie, sont de granulométrie plus importante comparés à ceux fabriqués dans l'Est Algérien. Les couscous d'Afrique de l'Ouest seraient encore plus gros.

Ustensiles de cuisson

Le *Couscoussier* en Afrique du Nord ou *Couscoussière* en Afrique de l'Ouest et en Afrique Noire (NDONG *et al.* 2007 ; VODOUHE *et al.* 1998), désignent en fait le même ustensile de cuisson. Autrefois, le couscoussier d'Afrique du Nord était fabriqué dans sa partie supérieure soit par une sorte de passoire en argile avec de gros trous soit en vannerie nommée "*halfa*" (MOHOUB et RABAA, 2003. Afin de garantir son étanchéité, il était consolidé avec de la pâte de couscous (HAL, 2000 ; .MOUHOUB et RABAA, 2003)

II.1.2. Pré- cuisson de la semoule

La pré-cuisson à la vapeur des matières premières est une variante du diagramme de fabrication du couscous dans le constantinois. Elle consiste à cuire à la vapeur la grosse semoule "*Fetla*" (>500 µm) une fois, pendant 8 à 10 min à 95°C, la veille du lancement d'une fabrication de couscous. La grosse semoule est ensuite étalée en couche mince sur un drap propre et laissée au repos sécher toute une nuit. Cette étape de pré- cuisson des matières premières dans les processus de fabrication de couscous d'Afrique de l'Ouest ressort pour la fabrication du couscous de *fonio*. Celle-ci se résume en une pré cuisson à la vapeur de 20 à 30 min des grains décortiqués qui après gonflement et un deuxième étuvage seront couscous (VODOUHE, 1998).

II.1.3. Hydratation, granulation et roulage

A travers les différents diagrammes de fabrications d'Afrique du Nord ou d'Ouest décrits plus haut, il ressort que tous les couscous ne sont pas tous obtenus après roulage. Alors que la majorité des couscous d'Afrique du Nord sont roulés, ceux d'Afrique d'Ouest ne le sont pas pour l'essentiel d'entre eux. Les exceptions sont celles montrés par le couscous de maïs d'Afrique de l'Ouest (ALUKA, *et al.*,1985) et par le *Thiéré* à base de mil ou de maïs (NDONG *et al.* 2007) qu'on rencontre essentiellement au Sénégal.

II.1.4. Tamisage et calibrage

En Afrique du Nord, des études faites au niveau de plusieurs villes de l'Est Algérien ainsi que quelques villes du Sud ont montré des diagrammes de fabrication à 03 tamis (KAUP and WALKER 1986 ; YOUSFI 2002) et d'autres à 05 tamis (BAHCHACHI 2002 ; DEROUICHE 2003). En Afrique de l'Ouest, il y a des processus de fabrication à 2 tamis (GALIBA 1987 ; ALUKA *et al.*1985) et d'autres à 03 tamis (NDONG *et al.* 2007). Cependant, en Afrique de l'Ouest, la variabilité du processus de fabrication varie en fonction des matières premières et les couscous obtenus sont différents alors qu'on Afrique du Nord et plus spécialement en Algérie, malgré que le produit fini soit le même, la variabilité dans le nombre et l'ouverture de mailles des tamis est une variante qui change d'une région à une autre et d'une ménagère à une autre.

II.1.5. Cuisson a la vapeur

En général, la majorité des processus de fabrication de couscous de blé dûr d'Afrique du Nord (KAUP and WALKER, 1986, GALIBA *et al.* 1987, BAHCHACHI 2002, ANGAR

et BELHOUCHET 2002, YOUSFI 2002, DEROUICHE 2003), ou d'Afrique de l'Ouest (ALUKA 1985, VODOUHE, 1998, NDONG *et al.* 2007, N'DIR et GNING 1989, T.P.A., 2000), retracent au minimum une cuisson à la vapeur en fin du diagramme de fabrication.

II.1.6. Séchage

Le séchage est un moyen de conservation du couscous et permet sa préservation des altérations microbiologiques et enzymatiques plus de six mois (GALIBA *et al.* 1987), assurant ainsi un approvisionnement annuel des ménages. Le séchage du couscous artisanal se fait en général en couche mince sur des draps propres pour arriver à une teneur en eau finale d'environ 13% (ALUKA *et al.*1985, KAUP and WALKER 1986, GALIBA 1987, N'DIR et GNING 1989, VODOUHE *et al.* 1998, T.P.A. 2000, BAHCHACHI 2002, ANGAR et BELHOUCHET 2002, YOUSFI 2002, DEROUICHE 2003, MOUHOUB et RABAA, 2003, NDONG *et al.* 2007).

II.2. Processus de fabrication du couscous a l'échelle macroscopique, microscopique et moléculaire

Très peu d'études ont décrit la fabrication du couscous au niveau des échelles macroscopique, microscopique et moléculaire. CUQ and ABECASSIS 2006, font partie des scientifiques qui se sont intéressé à cet aspect.

Echelle macroscopique

Selon CUQ and ABECASSIS 2006, trois étapes critiques de fabrication sont à souligner :

- L'étape d'**addition d'eau** et de **malaxage** est conduite de façon à ajouter des quantités suffisantes d'eau à la semoule sèche, de la distribuer de façon homogène au dessus des particules des composants du blé. Les étapes d'hydratation et de roulage sont responsables d'une oxydation notable des pigments caroténoïdes par l'action des lipases et des lipoxigénases (BOUDREAU et MENARD 1992) ou aussi par l'apparition d'un brunissement ayant pour origine la polyphénol oxydase (FEILLET 2000).
- L'étape de **granulation** permet l'agrégation des particules de semoules initiales en vue de former les granulats de couscous. La granulation se produit par l'apport d'énergie mécanique au cours du malaxage et du roulage ;
- Les étapes de **cuisson à la vapeur**, de **séchage** et de **refroidissement.** Alors que la première et la dernière étape sont conduites dans le but de gélatiniser l'amidon, le séchage

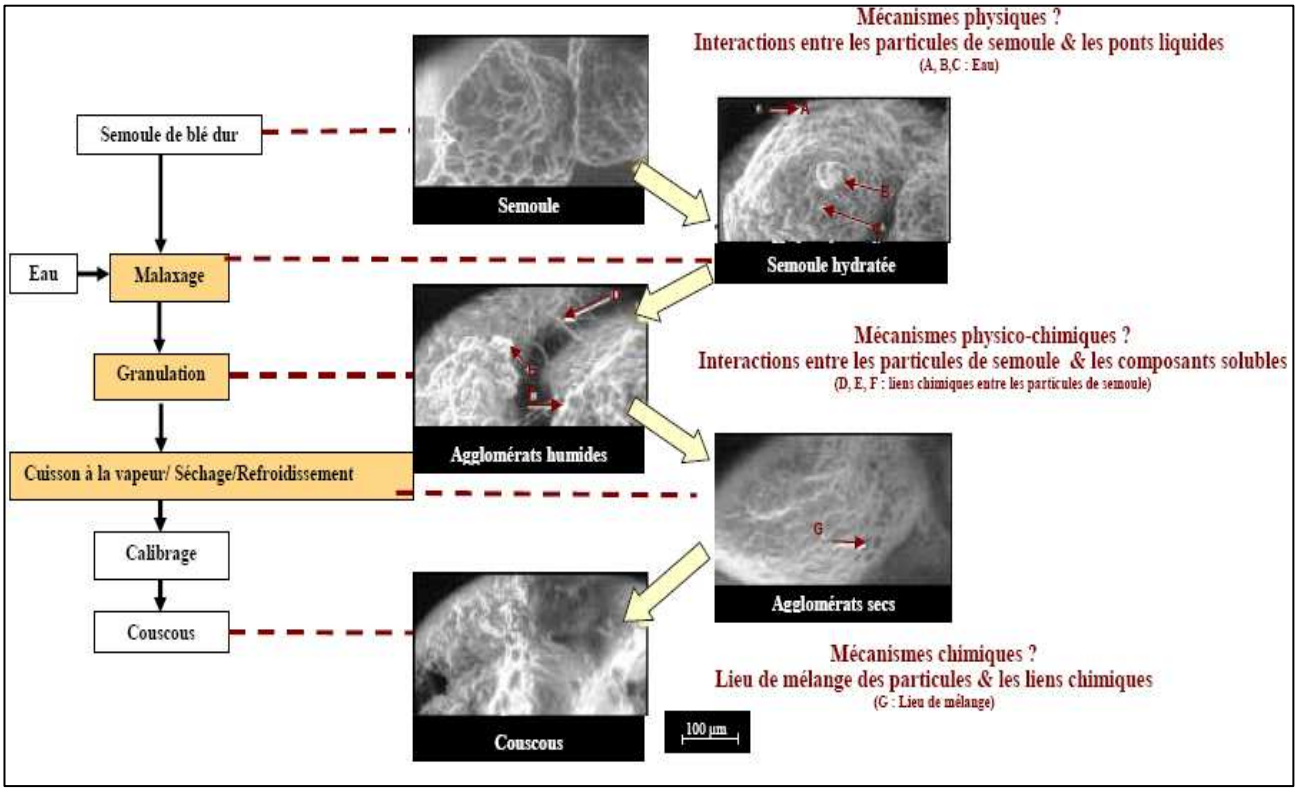


Figure 12. Microphotographies de grains secs et hydratés de semoule , d'agglomérats secs et humides, et grains finaux de couscous et hypothèses du mécanisme de formation des grains de couscous (CUQ and ABECASSIS 2006)

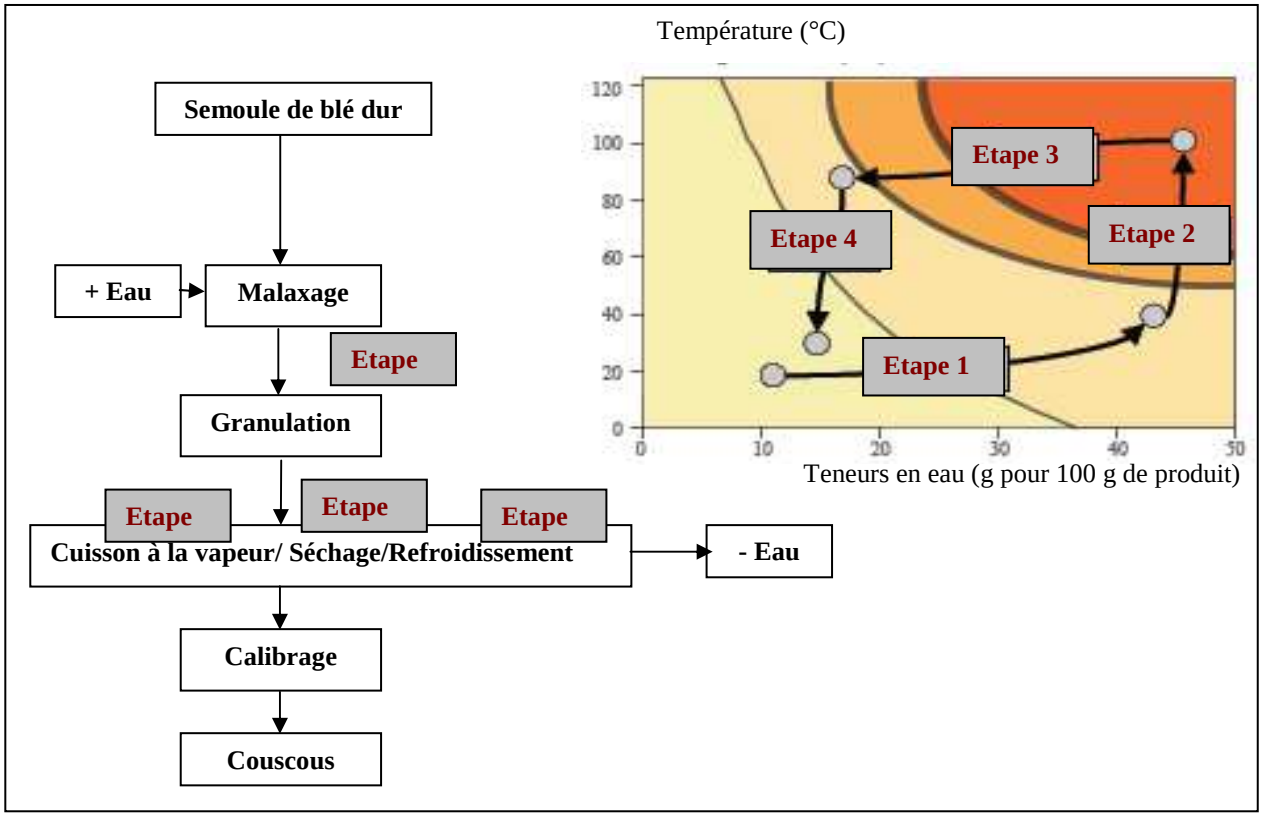


Figure 13. Superposition des étapes de fabrication du couscous sur le diagramme d'état des composants de blé dur (amidon & protéines) (CUQ and ABECASSIS 2006)

vise à stabiliser le produit fini par la réduction de son activité en eau et à améliorer la coloration du couscous humide (BOUDREAU et MENARD 1992).

Echelle microscopique

Ces auteurs montrent des microphotographies des particules de semoule sèche, après hydratation et les granules de couscous finaux (Figure 12). En vue d'essayer de comprendre le mécanisme impliqué dans la formation des granules de couscous, ils ont émis trois hypothèses. D'après eux la transformation des particules de semoule en grains de couscous pourrait résulter d'un système complexe de :

- Réactions physiques (entre les particules de semoule) ;
- Réactions physico-chimiques (entre les composants de blé dur) ;
- Réactions chimiques (entre les groupements réactifs sur les protéines).

Echelle moléculaire

A l'échelle moléculaire, la description du processus de fabrication du couscous est étudiée par la considération de la réactivité des composants du blé dur, plus particulièrement, l'amidon et les protéines. Les diagrammes d'état de l'amidon et des protéines sont superposés sur celui de la "température-contenu en eau" qui indique les principaux changements chimiques suivants (Figure 13) 'CUQ and ABECASSIS 2006) :

- La transition vitreuse des protéines ;
- La réticulation des protéines ;
- La gélatinisation de l'amidon.

Au cours du processus de fabrication du couscous, le changement dans le contenu en eau et de température induit des modifications significatives dans la réactivité des composants de la semoule. Cependant, il peut être noté que la formation de réseau de gluten n'a pas été démontrée durant la fabrication du couscous probablement en raison des faibles teneurs en eau et des faibles niveaux de malaxage (CUQ and ABECASSIS 2006). Selon ces auteurs, il est possible de tracer les quatre principales étapes de fabrication de couscous sur le diagramme d'état des composants de blé dur (amidon & protéines) (Figure 13).

III. QUALITE DU COUSCOUS

Un couscous est considéré de bonne qualité lorsque la taille de ses particules est uniforme et lorsqu'il ne présente pas d'odeurs inhabituelles. Après cuisson, il doit être ferme et non collant (ABOUBAKAR et HAMAKER, 2000), les grains de couscous doivent avoir

une grande capacité d'absorption et garder leur intégrité après cuisson à la vapeur ou addition de sauce (KAUP and WALKER, 1986 ; OUNANE *et al.* 2006, GUEZLANE et ABECASSIS 1991) et doit avoir un bon rendement (ABOUBAKAR and HAMAKER, 1999). Les attributs concernant la taille et la couleur des couscous est une question de préférences qui varie d'une région à une autre et d'un pays à un autre (KAUP and WALKER, 1986 ; GALIBA *et al.,* 1987 ; ALUKA *et al.,* 1985). La qualité du couscous dépend des matières premières utilisées et leur composition biochimiques (LAINGNELET *et al.,* 1972 ; KOBREHEL et ABECASSIS, 1985 ; KAUP and WALKER 1986 ; GALIBA 1987 ; GUEZLANE, 1993 ; DEBBOUZ *et al.,* 1994 ; DEBBOUZ and DONELLY, 1996 ; IDIR 2000 ; YOUSFI 2002 ; HEBRARD *et al.,* 2003 ; CUQ and ABECASSIS 2006), de la taille des particules de semoule (DEBBOUZ *et al.,* 1994 HEBRARD *et al.* 2003) ainsi que du processus de fabrication (CUQ and ABECASSIS 2006).

III.1. Paramètres influençant la qualité du couscous

III.1.1. Matières premières

La couleur des couscous secs constitue pour le consommateur un critère d'appréciation important. En Afrique du Nord, les produits clairs, peu bruns de coloration jaune sont les plus recherchés. Cette coloration est liée au taux de caroténoïdes des semoules qui varient en fonction de la variété de la matière première utilisée ainsi qu'aux réactions de brunissement enzymatique et non enzymatique (LAINGNELET, KOBREHEL FEILLET 1972 ; KOBREHEL et FEILLET 1985 ; GUEZLANE 1993 ; DEBBOUZ *et al.,* 1994 ; YOUSFI 2002). D'après GUEZLANE *et al.* 1986, la cuisson du couscous avant son séchage accroîtrait son indice de jaune. Par ailleurs, un taux d'extraction élevé (60 et 70) diminue la clarté du produit fini et altère sa qualité (IDIR 2000).

III.1.2. Composition biochimique des matières premières

Protéines

La relation entre les protéines et la qualité finale du couscous cuit est discutée et les résultats de la littérature sont disparates. Alors que BOUDREAU et MENARD 1992 ainsi que DEBBOUZ *et al.* 1994, ont monté une proportionnalité entre la qualité, la quantité de protéines et l'absorption d'eau au cours du roulage, le rendement et l'amélioration de la qualité de cuisson, OUNANE *et al.*,2006 ont trouvé une relation inverse entre l'indice de gonflement du gluten des matières premières et sa force. Par ailleurs, les travaux

d'ABECASSIS et FEILLET, 1985 corroborent ceux de OUNANE *et al.* 2006 concernant l'absorption d'eau.

Quant au collant des couscous, DEBBOUZ *et al.* 1994 ont montré que plus les teneurs en protéines des semoules de blé dur sont élevées et moins les couscous sont collants. En effet, BARNES *et al.* 1981, décrivent la formation de liaisons protéines-amidon au cours des traitements themiques que subissent les couscous pendant leur fabrication. La matrice protéino-glucidique empêcherait l'amylose de l'amidon de migrer vers la surface des grains de couscous lors de leur cuisson. Selon GUEZLANE *et al.* 1998, c'est ce phénomène de diffusion qui serait responsable de la désintégration des particules de couscous et de l'augmentation de leur caractère collant. Par ailleurs, ABOUBACAR and HAMAKER 1999, ont trouvé une proportionnalité entre les gluténines et le collant pour des couscous de sorgho.

Lipides

Plusieurs études ont montré l'effet des lipides en pastification (MATSUO *et al.* 1986) qui sont essentiellement impliqués dans la couleur et dans les caractéristiques de cuisson des pâtes. Pour le couscous, les travaux sont à débattre. Alors que OUNANE *et al.* 2006 indiquent que la qualité des couscous cuits est indépendante du contenu en lipides totaux (lipides libres, lipides libres polaires et apolaires, glycolipides et phospholipides) des semoules de blé dur. Les travaux de YESLI 2001, montrent que la fabrication de couscous à partir de semoules délipidées affecte leur couleur, diminue le rendement et favorise le collant, la délitescence ainsi que la capacité d'hydratation.

Amidon endommagé

D'après GALIBA *et al.* 1988 ainsi que ABOUBACAR et HAMAKER 1999, le taux d'amylose dans les fines semoules est positivement corrélé aux quantités d'eau nécessaires au roulage pour la fabrication des couscous de sorgho.

Les fortes corrélations trouvées entre l'amidon endommagé, le collant et le temps de réhydratation des couscous peuvent être reliées aux quantités de matériel solubilisé couvrant la surface du couscous (ABOUBACAR et HAMAKER 1999 et 2000 ; DEBBOUZ *et al.* 1994). D'après ces auteurs, l'influence du temps de réhydratation sur le collant du couscous peut être attribué en partie aux quantités d'eau restant sur la surface des grains de couscous qui ont montré un taux d'absorption d'eau relativement bas. Différemment aux produits

pastiers, le matériel solubilisé au cours de la cuisson du couscous n'est pas perdu mais reste sur la surface du couscous qui subit un traitement thermique à la vapeur favorisant ainsi le caractère collant de celui-ci. Par ailleurs, les farines fines contenant des amidons composés de 100% d'amylopectine donneraient des couscous collant inacceptables par les consommateurs.

Pigments caroténoïdes et Cendres

D'après YOUSFI 2002 et DEROUICHE 2003, les ménagères algériennes choisissent la semoule jaune pour la fabrication de couscous, qui, d'après leur expérience leur donnent des couscous de bonne qualité. Ceci n'est pas vraiment faux puisque l'indice de jaune est corrélé avec les teneurs en protéines (TRENTESEAUX 1993). BOUDREAU et MENARD (1992), indiquent que la valeur pastière des semoules de blé dur est proportionnelle à ses teneurs en protéines. D'autre part, ABOUBACAR and HAMAKER 1999, ont montré une corrélation inverse entre le collant des couscous et leur taux de cendres.

III.1.3. Taille des particules

La granulométrie des matières premières servant à la fabrication du couscous revêt une grande importance dans le processus de fabrication. D'après DEXTER et MATSUO 1978 ainsi que BOYACIOGLU et UNAL 1992 ainsi que IDIR 2000, les fines semoules obtenues par l'augmentation du taux d'extraction entraîne un accroissement du taux de protéines, de l'amidon endommagé, des cendres et de la coloration brune. Alors que la coloration jaune reste pratiquement constante avec le taux d'extraction, le gluten diminue légèrement.

La taille des particules de semoule influence leur cinétique de sorption. Plus les particules sont fines, plus leur cinétique de sorption est rapide (HEBRARD *et al.* 2003). Ces auteurs indiquent que ces différences sont liées aux facteurs physiques essentiellement la température. Tandis que la composition biochimique influence la capacité de sorption, la vitesse de prise en eau de la semoule est régie par des phénomènes physiques (température, temps et niveau de malaxage). Dans le même contexte, DEBBOUZ *et al.*, 1994, montrent que la semoule fine absorbe plus d'eau au cours de l'étape de malaxage et d'agglomération que la semoule de taille intermédiaire ou grosse. Selon ces auteurs ceci affecte négativement le rendement en couscous et engendre la formation d'agglomérats très grands. Ces derniers qui sont rencontrés lors de l'utilisation de la semoule fine, sont écartés de la fabrication du couscous. Ceci est confirmé par les travaux de TIGROUDJA et BENDJOUDIOUADDA

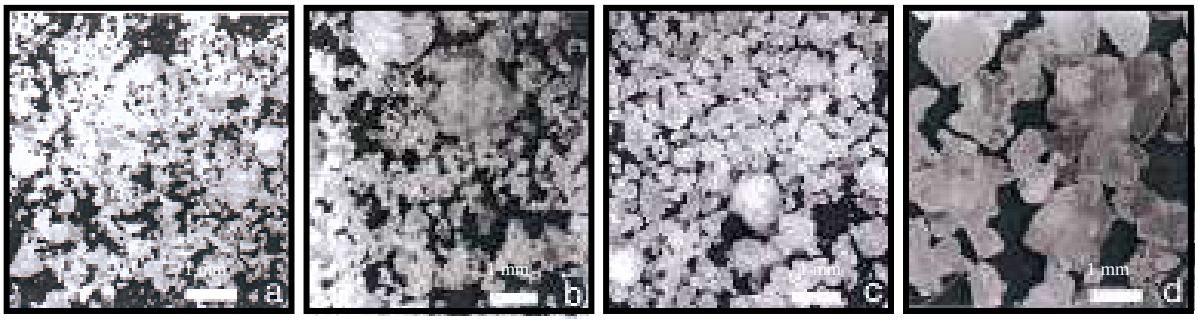


Figure 14. Microphotographies de farines, de couscous cru et cuit à la vapeur de sorgho SSV8 moulu par des procédures traditionnelles et mécaniques : a, farines moulues mécaniquement, b : farines moulues traditionnellement, c : couscous des farines moulues mécaniquement, d : couscous des farines moulues traditionnellement GALIBA *et al.* 1987.

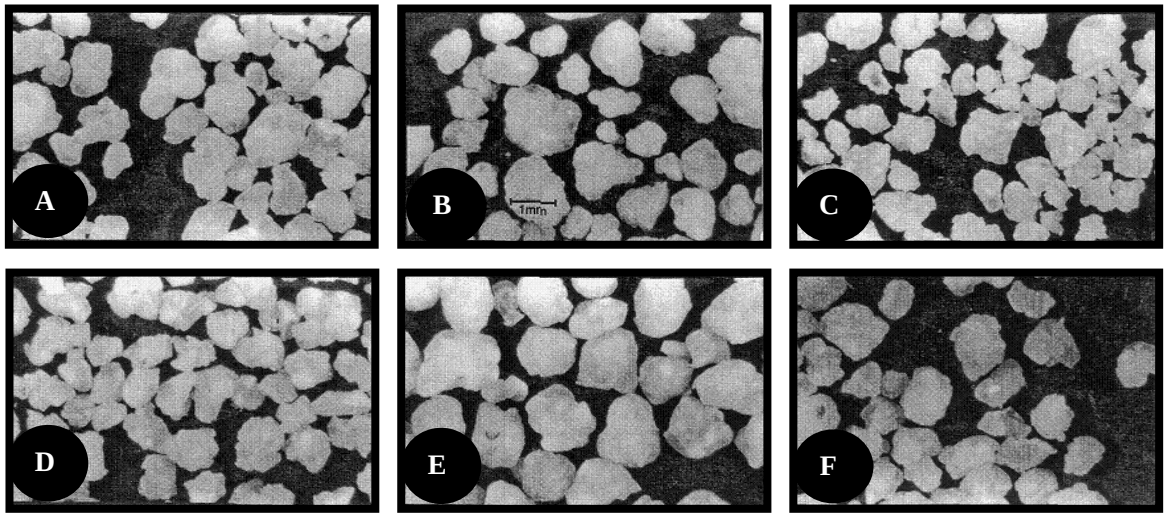


Figure 15. Microphotographies d'échantillons de couscous (KAUP and WALKER 1986). A : Couscous industriel Français, B : Couscous industriel acheté au *LINCOLN, NE, food co-op*, C : Couscous industriel Tunisien *Capa*, D, E, F : Couscous artisanaux tunisien.

1999, qui ont indiqué que les semoules fines et moyennes à taux élevé d'hydratation donnaient des couscous de granulométrie élevée. Par ailleurs, ALUKA *et al.* 1985, ont montré que les couscous fabriqué à partir de semoules fines de maïs (300 µm) ont un meilleur aspect avec des grains uniformes, plus lisses et plus ronds.

III.1.4. Processus de fabrication

GALIBA *et al.* 1987, ont étudié l'effet du procédé de mouture (traditionnel et mécanique) des matières premières sur des couscous de sorgho SSV8 et de millet perlé fabriqués en Afrique de l'Ouest (Figure 14). Les farines obtenues par broyage traditionnel ont des indices de taille des particules et de gonflement plus élevés et nécessitent plus d'eau pour l'agglomération des particules. De même, les rendements et les humidités finales des couscous sont aussi élevés que ceux des farines obtenues par broyage traditionnel. Les farines de mouture traditionnelle sont plus fines que celles obtenues par broyage mécanique (Figure 14 a,b). Le couscous du broyage traditionnel présente une distribution de particules plus larges accompagnées de plus de fines particules que pour le couscous obtenu à partir des farines moulues mécaniquement (Figure 14 c,d). Ces auteurs concluent à ce que la procédure de broyage et la taille des particules affectent plus les teneurs en eau des couscous que le type de céréale. Par contre, le type de céréale influe beaucoup plus l'apparence des couscous ainsi que les préférences des consommateurs

KAUP and WALKER (1986), montrent que les couscous de fabrication artisanale (Figure 15 D-F) sont en général, de granulométrie plus fine que ceux du commerce (Figure 15 D, F), avec une cohésion et une élasticité plus élevées (YETTOU *et al.* 1997). Nonobstant, ceci n'est pas une règle générale et on peut citer le cas du couscous industriel Tunisien *Capa* (Figure 15 C), qui est plus fin que ceux de fabrication artisanale. On peut noter également que les granules de couscous de fabrication artisanale sont plus lisses et plus uniformes avec prédominance de formes arrondies et ovales contre des particules rugueuses sous forme d'agglomérats hétérogènes pour ceux de fabrication industrielle (Figure 15 A, B, C). Ces travaux viennent attester ceux de GUEZLANE et SENATOR 1985.

DEBBOUZ and DONELLY 1996 décrivent l'effet du processus de fabrication (artisanalement et industriellement par extrusion) sur du couscous de blé dur. Ceux fabriqués artisanalement sont plus clairs et chaque granule de couscous présente des particules de semoule agrégées à sa surface comparée aux surfaces des granules de couscous extrudés qui

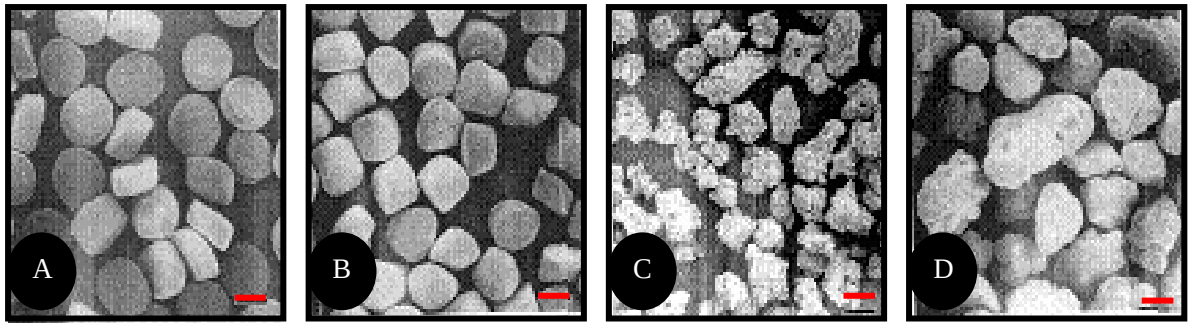


Figure 16. Microphotographies au Scanner électronique (×12) montrant la taille des particules et l'uniformité de la forme de : A : Couscous extrudés deux fois, B : couscous extrudés une fois, C : couscous de fabrication artisanale, C : couscous de fabrication industrielles (DEBBOUZ and DONELLY 1996).

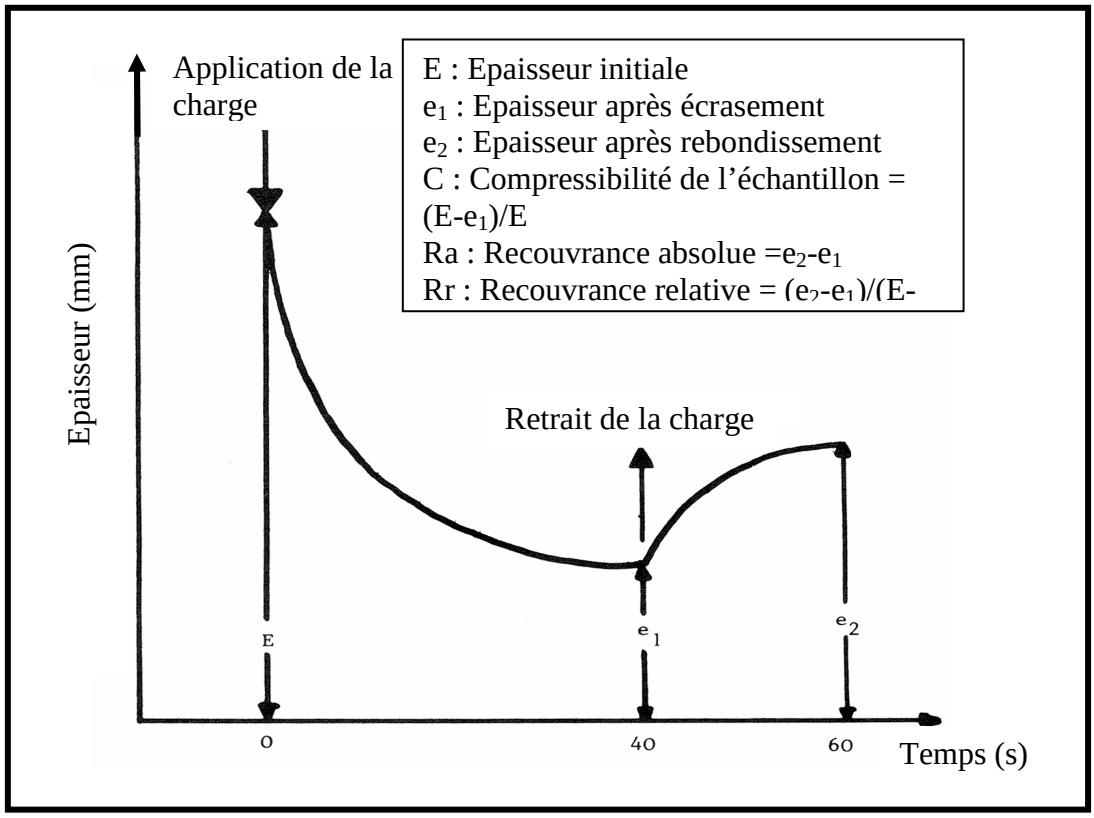


Figure 17. Viscoélastogramme d'un échantillon de gluten obtenu avec le viscoélastographe de Chopin (ROUSSET et LOISEL 1984 ; YETTOU *et al.* 1997).

sont très lisses (Figure 16). Les couscous doublement extrudés montrent un indice d'absorption d'eau significativement élevé, de courts temps de réhydratation et de cuisson,une meilleure apparence, flaveur et acceptabilité générale que les couscous agglomérés. Les couscous extrudés une seule fois ont une mauvaise qualité de cuisson et ont été mal classés par rapport au goût, à la flaveur et à l'acceptabilité générale.

Les conditions de malaxage influeraient également le rendement de granulation (CUQ and ABECASSIS 2006). Les résultats expérimentaux de ces auteurs obtenus avec des teneurs en eau entre 28 et 38%, ont montré une proportionnalité entre les niveaux d'eau et les rendements en granulats. Par ailleurs, ils ont constaté que les facteurs mécaniques avaient un effet opposé sur les rendements en granulats en fonction des niveaux d'addition d'eau.

III.2. Appréciation de la qualité culinaire d'un couscous

A cet égard, GUEZLANE et ABECASSIS 1991 indiquent que l'appréciation de la qualité peut être approchée aussi bien de façon instrumentale que sensorielle.

III.2.1. Appréciation instrumentale

Les critères retenus pour évaluer la qualité culinaire du couscous par GUEZLANE et ABECASSIS 1991 ; YETTOU *et al.* 1997 ; KHENDEK et GUEZLANE 1998 ; YETTOU *et al.* 2000, sont essentiellement :

- ***Le gonflement :*** Représente la capacité d'absorption d'eau par les granules de couscous au cours de la cuisson (YETTOU *et al.* 1997). Lorsque cet estimateur est mesuré à 100°C, il renseigne sur la fermeté des couscous (GUEZLANE et ABECASSIS 1991). Des valeurs élevées du gonflement du couscous renseignent sur la haute qualité de celui-ci (OUNANE *et al.* 2006) ;
- ***La délitescence :*** Correspond à l'aptitude des particules de couscous à conserver leur intégrité durant et après cuisson. D'après OUNANE *et al.* 2006, des couscous qui se délitent peu sont des produits de très bonne qualité ;

- ***Propriétés viscoélastiques :*** Celles-ci se rapportent essentiellement à la texture et se résumeraient à (YETTOU *et al.* 1997) :

- La fermeté (mm) : Celle-ci correspond à l'épaisseur du rebondissement (e_1) lue sur le viscoélastogramme (Figure 17) après suppression de la force de compression appliqué sur

l'échantillon de couscous. Lorsque ce descripteur est mesuré par le texturomètre *INSTRON*, elle correspond alors à la force moyenne nécessaire pour extruder avec une vitesse constante (100 $mm.min^{-1}$) le produit à travers une grille (14 trous de 6 mm de diamètre) (GUEZLANE et ABECASSIS 1991) ;

- L'élasticité (mm) : Mesurée au viscoélastographe Chopin. Elle correspond à la Recouvrance Absolue (Ra) (Figure 17) ;

- La cohésion : Informe sur la bonne adhésion des particules au cours du roulage. Elle est calculée par la Recouvrance relative (Rr) lue sur le viscoélastogramme (Figure 17);

- L'indice de viscoélasticité : C'est une composante qui joint entre l'élasticité et la viscosité du couscous. Elle est calculée par la formule suivante : IV = 10Rr/C où C : Compressibilité de l'échantillon de couscous dans le viscoélastographe Chopin ;

- Le collant est également un important critère de viscoélasticité. Il rend compte de l'agglutination des particules de couscous entre elles après hydratation. Ce descripteur peut être évalué soit par le calcul d'un Indice de Prise en Masse du couscous (IPM), soit par des texturomètres tels que le TA-XT*2i* (ABOUBACAR and HAMAKER 2000) ou l'*INSTRON* (GUEZLANE et ABECASSIS 1991). D'après OUNANE *et al.* 2006, de faibles valeurs de prise en masse et donc de collant sont des indicateurs sur la haute qualité des couscous ;

III.2.2. Evaluation sensorielle

Les critères de jugement portaient essentiellement sur une appréciation visuelle de la forme, l'aspect et la couleur des grains de couscous ainsi que sur leurs degrés de grenaison et d'agglutination, à leur fermeté à la dent qui est définie selon la norme *ISO 4120* comme étant la résistance au cisaillement des pâtes entre les dents et à l'écrasement entre la langue et le palais. La prise en masse du couscous renseigne sur son collant. Ce dernier est apprécié visuellement par la facilité d'émottage à l'aide d'une fourchette ainsi qu'en bouche (GUEZLANE et ABECASSIS 1991).

La recherche de corrélations entre les résultats de l'analyse sensorielle et l'évaluation instrumentale ont permis d'aboutir dans leur ensemble aux mêmes résultats et conclure qu'un couscous ferme est moins collant et plus facile à d'émotter (GUEZLANE et ABECASSIS 1991).

MATERIEL & METHODES
Partie 3

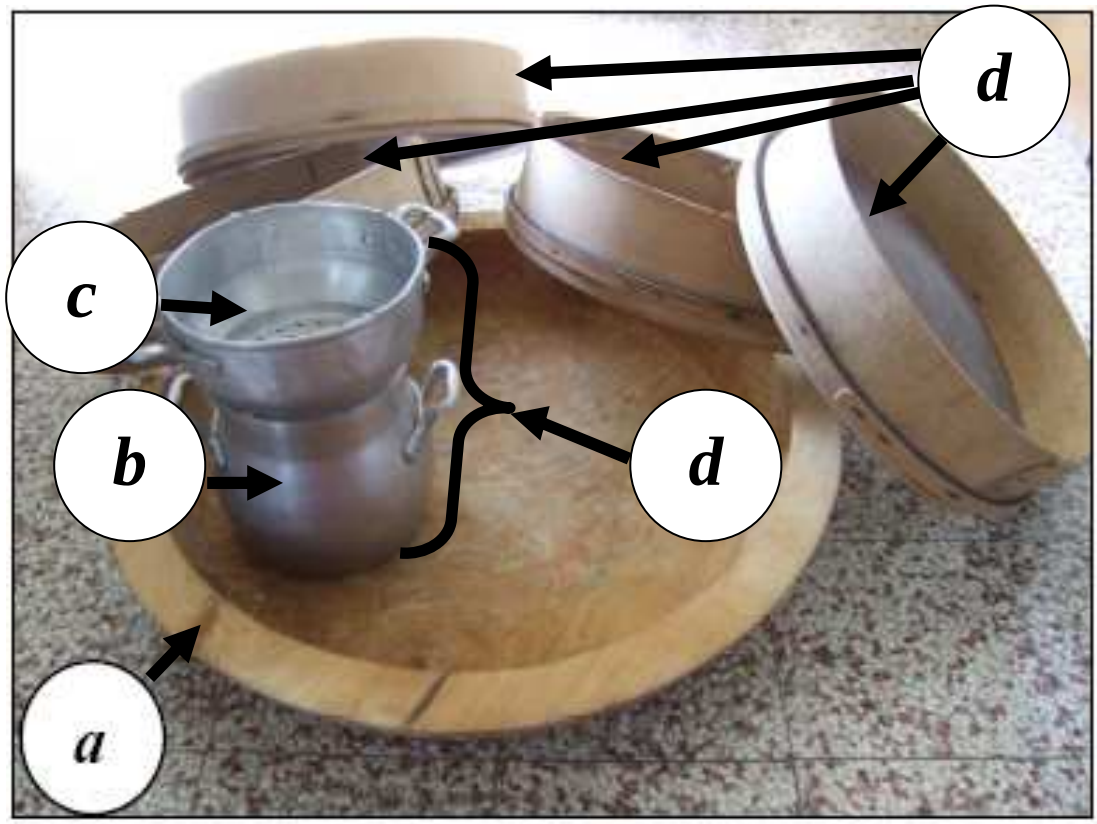


Figure 18. Ustensiles de fabrication du couscous sans gluten (BENATALLAH *et al.* 2008). ***a :*** "*gessâa*", ***b :*** "*borma*", ***c :*** "*keskess*", ***d :*** "*couscoussier*", ***e :*** tamis nommés "*dekkak*", "*reffad*", "*meâaoudi*" et "*sekkat*".

L'aptitude des trois formules proposées à donner du couscous est vérifiée sur une fabrication manuelle selon un des diagrammes traditionnels du Constantinois. Elle est évaluée par comparaison des niveaux de rendement de production et par l'appréciation de la qualité des couscous obtenus au niveau de la structure des particules formées, comportement à la cuisson et analyse sensorielle.

I. MATIERES IMPLIQUEES

I.1. L'eau d'hydratation

L'eau distillée utilisée pour les fabrications de couscous ainsi que pour tous les tests effectués au laboratoire de l'I.N.A.T.A.A est obtenue à partir du distillateur LENZ GLASINSTRUMENTE, MonoDest 3000 (pH = 6,14 ± 0,16).

I.2. Le sel

Du sel fin de cuisine iodé du commerce produit par l'Entreprise Nationale Algérienne de sel E.N.A.*sel* a été utilisé pour les fabrications de couscous.

II. MATERIEL TRADITIONNEL DE FABRICATION DE COUSCOUS

Les ménagères utilisent pour la fabrication traditionnelle de couscous un cuiseur qu'on appelle "*couscoussier*" (Figure 18), qui se compose de deux compartiments. Un générateur de vapeur contenant la sauce où cuisent la viande et les légumes appelés "*borma*" et, au dessus de lui une sorte de passoire recevant la vapeur contenant le couscous dénommée "*keskess*". Les opérations de roulage se font dans un grand récipient en bois désigné par le nom de "*gessâa*" (Figure 18). Quatre tamis différents nommés "*dekkak*", "*reffad*", "*meâaoudi*" et "*sekkat*" (Figure 18) sont utilisés pour les opérations de tamisage ou de calibrage et correspondent respectivement aux ouvertures de mailles suivantes : 500, 1000, 1130 et 1280 µm.

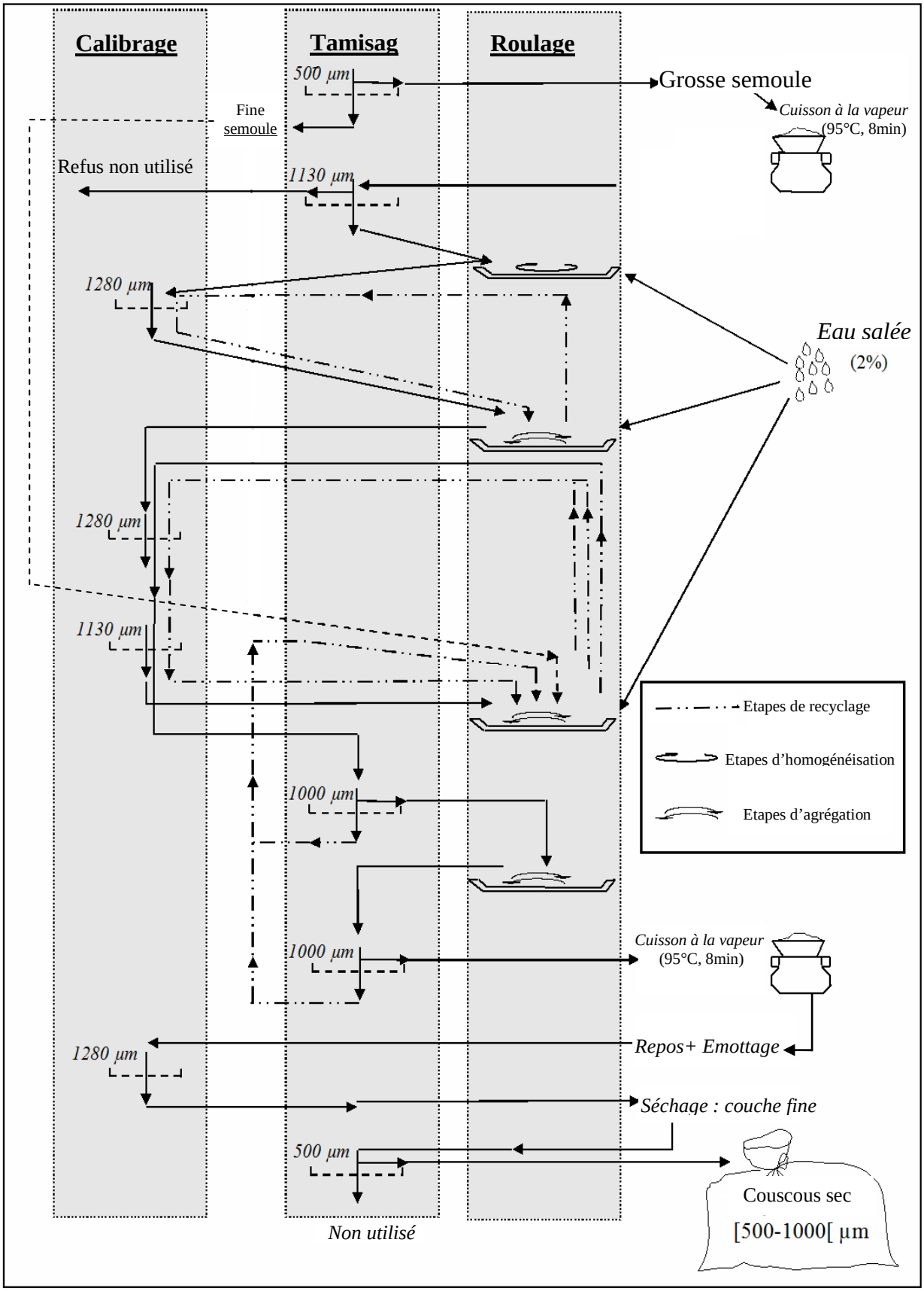


Figure 19. Diagramme traditionnel de préparation du couscous selon le mode de préparation dans le nord Est Algérien (BENATALLAH *et al.* 2008).

III. DIAGRAMME TRADITIONNEL DE FABRICATION

Une quantité de 500 g de grosse semoule (> 500 µm) est précuite à la vapeur dans le "*keskess*" pendant 8 min à 95°C (Figure 19). Après émottage et refroidissement, la fraction des grosses particules, supérieure à 1130 µm résultant de cette pré cuisson est éliminée. Le passant est ensuite brassé dans la "*guessâa*" par un mouvement circulaire à l'aide des bouts des doigts avec ajout progressif d'eau salée. L'étape de roulage qui s'en suit s'effectue à l'aide du plat des mains en appliquant une légère pression sur les particules dans un mouvement arqué de *va et vient.* Cette action a pour rôle d'agréger les éléments de semoules tout en les roulant. Après chaque étape de roulage et d'agrégation, les grains de couscous sont contrôlés par tamisage et calibrage dans des tamis appropriés. Le calibrage consiste à forcer par pression de la main toutes les particules agrégées, à passer à travers un ou plusieurs tamis. Il se fait dans un ordre décroissant d'ouvertures de mailles : 1280µm (*sekkat*) et 1130 µm (*meâaoudi*). Aux agrégats calibrés à moins de 1130µm, la fine semoule (< 500 µm) est progressivement additionnée tout en assurant le roulage. L'hydratation est poursuivie par des ajouts d'eau salée intermittents avec le roulage. Le sassage se fait à la fin pour récupérer les aggrégats de couscous de diamètre supérieur à 1000µm. Ces derniers sont cuits à la vapeur à 95°C pendant 8 min. Le passant du "*reffad*" (<1000 µm), est recyclé. Afin d'assurer l'individualisation des éléments du couscous final, un dernier calibrage est fait avec le *sekkat* (1280 µm). Le séchage se fait en couche fine à l'ombre sur un drap propre. La granulométrie du couscous sec ([500-1000 µm[), est contrôlée par un tamisage sur le *dekkak* (500 µm) en vue d'éliminer les fines particules ayant échappé au roulage sont éliminées par tamisage sur un tamis de 1000µm avant cuisson. Celles-ci viennent donc d'une désintégration partielle des agglomérats après calibrage et séchage.

IV. MESURE DU VOLUME SPECIFIQUE DU COUSCOUS SEC

Le volume de 100 g de chaque couscous fabriqué est lu sur une éprouvette de 200 ml. La masse volumique ρ en (g/ml) est alors donné par le rapport de 100g de couscous sec sur leur volume.

V. ESTIMATION DU RENDEMENT

Le rendement en couscous produit est calculé en rapportant la masse de couscous sec à la somme des masses de semoule fine et grosse de départ impliquées lors de la réalisation du diagramme de production.

VI. CARACTERISATION GRANULOMETRIQUE

La granulométrie des couscous fabriqués est obtenue après séchage par le passage de 1kg de chacun à travers la batterie de tamis : 1000, 800, 630 et 500 µm d'ouvertures de mailles.

VII. APPRECIATION DE LA QUALITE DES COUSCOUS

La cuisson du couscous est habituellement réalisée à la vapeur et le test permettant d'apprécier la qualité culinaire mérite d'être réalisé en appliquant le même type de traitement thermique. Cela nécessiterait un couscoussier expérimental ou un roulage équivalent pour évaluer avec une précision acceptable les critères de qualité recherchés. Dans cette présente étude, le comportement à la cuisson des couscous étudiés a été approché de deux manières :

- La première qui serait plus simple et plus rapide utilise le comportement du couscous dans l'eau liquide et permet de comparer les échantillons par rapport à leur capacité de gonflement.
- La deuxième utilise une cuisson à la vapeur et vise en plus de la capacité d'absorption de l'eau par les couscous l'appréciation de la tenue ou désintégration des agglomérats formant le produit.

VII.1. Mesure de l'Indice de Gonflement (IG)

La cinétique de gonflement des couscous est suivie dans un bain marie pendant 1 heure de temps (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 et 60 min.), à 25 et à 100°C. Une quantité de 20g de couscous sec est mise dans une éprouvette (200 ml). Après avoir noté le volume initial (Vi) du couscous, 50 ml d'eau distillée sont rajoutés le long de l'éprouvette inclinée. Après avoir fermé les éprouvettes, celles-ci subissent 10 retournements successifs afin de bien hydrater l'ensemble des particules. Une nouvelle quantité de 50 ml est rajoutées pour faire descendre les particules de couscous collées aux parois. Les éprouvettes sont placées dans un bain marie et l'Indice de Gonflement (IG) est calculé comme suit (YETTOU *et al.* 2000) :

$$IG\ (\%) = \frac{(V_f - V_i)}{V_i} \times 100$$

Où : Vf : Volume final de couscous.

VII.2. Mesure du Degré de Désintégration (DD)

La perte de matière est mesurée après cuisson à la vapeur des couscous. Une quantité de 10g de couscous cuit est versée dans un becher contenant 50ml d'eau distillée. L'ensemble

est soumis à une agitation à vitesse constante. Une agitation du couscous cuit est assurée pendant 5 min. Le surnageant est récupéré par filtration sur un tamis de 630 µm. Une partie aliquote de 10 ml de ce liquide est séchée dans une étuve réglée à 100°C jusqu'à poids constant. Les pertes de matières nommées par le Degré de Délitéscence (DD) est exprimée pour 100 g de matières sèches selon (YETTOU *et al.* 2000) :

$$DD(\%) = \frac{(Es \times V \times 100)}{10 \times MCC \times (100 - H)} \times 100$$

Où : *Es* = Extrait sec (g) ; *V* = volume d'eau distillée (50 ml) ; *MCC* = Masse de Couscous Cuit (10g) ; *H* = Teneur en eau du couscous cuit.

VII.3. Mesure de la Capacité d'Absorption d'eau (CA) et de l'Indice de Prise en masse (IPM)

La Capacité d'Absorption (*CA*) est recherchée pendant 1 heure de temps à 100°C (GHEZLANE *et al.*1986). Elle est donnée par la formule suivante :

$$CA(ml/100g\ MS) = \frac{(V_f - V_i)}{(20 \times (100 - H))} \times 100$$

Où : Vi : Volume initial de couscous, Vf : Volume final de couscous, MS :Matière sèche.

L'Indice de Prise en Masse (*IPM*) est recherché à 8, 12, 16, 20, et 24 min. de cuisson à la vapeur du couscous (100°C) dans un couscoussier. Il est donné par (GUEZLANE 1993) :

$$IPM(\%) = \left(\frac{Refus3300\mu m}{Pe} \right) \times 100$$

Où Pe : Prise d'essai.

VIII. APPRECIATION DE LA MICROSTRUCTURE DU COUSCOUS

L'aspect des grains de couscous roulés est obtenu par un appareil photo numérique (*FUJIFILM, FinePix E900, 9MEGA PIXELS*) couplé à une binoculaire (*PARALUX, XTB 01*).

IX. EVALUATION SENSORIELLE DES COUSCOUS

Nos couscous cuits sont appréciés par un test de classification par rang "*test de FRIEDMAN "* (ANONYME 1995). Ce test consiste à présenter à un jury de 10 dégustateurs, 5g de chaque couscous. Ces derniers sont codés A, B, C et D, incluant le couscous témoin.

Les dégustateurs ont à classer ces 4 échantillons par ordre croissant d'intensité de 1 à 10 selon les descripteurs qu'on résume dans le tableau 19.

Tableau 19. Descripteurs sensoriels décrivant la texture et l'aspect général des couscous sans gluten cuits, retenus pour le test de *Friedman.*

Sensation	Descripteur	Définition
Visuelle	*Couleur des couscous*	- Classement des couscous du foncé au clair
Tactile	*Collant*	Facilité à former des mottes ou difficulté à dissocier les mottes de couscous par la cuillère
En bouche	*Fermeté sous la dent*	- Force nécessaire pour écraser l'équivalent d'une petite cuillère de couscous avec les molaires
Olfactive	*Odeur*	- Evaluation de présence d'une odeur non spécifique au couscous en fonction de son intensité

Ce test d'évaluation sensorielle est effectué sur du couscous cuit à la vapeur mais sans sauce. Pour chaque descripteur, la comparaison globale des échantillons testés est réalisée avec le calcul de la statistique "*F*" *de Friedman*

$$F = 12/(JP\,(P+1)(\,R_1^2 + R_2^2 + \ldots\, R_p^2) - 3J(P+1)$$

Où : J : nombre de testeurs; P : nombre d'échantillons ; ($R_1^2 + R_2^2 + .. R_p^2$) : somme des rangs attribués aux *P* échantillons et aux *J* testeurs.

X. ANALYSE STATISTIQUE

Concernant les résultats de cette partie, l'analyse statistique est effectuée par StatView 5ème version, (Abacus Concepts ™, Berkeley,USA) et par XLSTAT (version 7.5.2.). La comparaison entre plusieurs moyennes est effectuée par l'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur. Le test de Tukey/Kramer ou de Buferroni/Dunn sont utilisés pour la comparaison entre les groupes individuels de moyennes. La comparaison entre deux pourcentages à faibles effectifs présentés dans ce travail est réalisée par le test du Khi-Deux. La comparaison entre les variables expliquées et une ou plusieurs variables explicatives est obtenu par le calcul de régressions linéaires simples (SCHWARTZ 1993). Dans cette étude, le niveau de significativité est fixé à 0,05.

RESULTATS & DISCUSSION
Partie 3

Figure 20. Opérations de roulage le long des principales étapes du diagramme de fabrication des couscous. T : Témoin, RF : Riz-Fèverole, RC : Riz-pois Chiche, RP : Riz-Pois protéagineux

Figure 21. Aspect des couscous sans gluten comparés au témoin de blé dur. CT : Couscous Témoin, CRF : Couscous Riz-Fèverole, CRP : Couscous Riz-Pois protéagineux, CRC : Couscous Riz-pois Chiche.

La faisabilité technologique approchée dans ce travail essaye de répondre à la question suivante : comment les produits de mouture de riz et de légumes secs ont permis l'agrégation et le développement des particules de couscous tout au long des étapes du processus de roulage, en accord avec le diagramme traditionnel décrit ? Les réponses enregistrées dans cette étude peuvent être perçues à travers :

- Les observations de la structure des couscous ;
- la distribution des différents couscous secs obtenus ;
- Le rendement en couscous ;
- Le degré de désintégration des couscous

I. MICROSTRUCTURE DES COUSCOUS FABRIQUES

I.1. Développement des agglomérats de couscous lors de la fabrication

Le suivi des opérations de roulage le long des étapes du diagramme n'ont pas donné des grains de couscous sphériques tel qu'imaginé et ce, en considérant les mouvements de roulage dans la "*guessâa*". Les grains de tous les types de couscous étudiés présentent un microrelief avec des aspérités correspondant aux particules des fines semoules attachées à la surface des plus grosses particules qui ne sont autre que celles des grosses semoules.

Après un premier mélange des ingrédients, humectage et tamisage, un début de formation des grains de couscous est noté pour le témoin de blé dur contrairement aux formules sans gluten (Figure 20) où l'adhésion des particules est peu apparente. L'accroissement des grains de couscous continue avec les étapes de roulage. En fin de diagramme de fabrication, et après cuisson à la vapeur puis séchage, les grains de couscous semblent être plus lisses et homogènes dans le cas du CT et du CRF que le reste des CSG.

I.2. Structure des agglomérats de couscous secs

Le couscous témoin et le CRF semblent avoir des aspects plus lisses et homogènes dans la structure des grains contrairement aux CRP et CRC (Figure 21). Etant donné que le CRF est significativement plus riche en protéines que le reste des CSG ($P < 0,0001$), un rôle déterminant pourrait être attribué à ces protéines là. La bonne adhésion qui se produit au cours de la préparation du

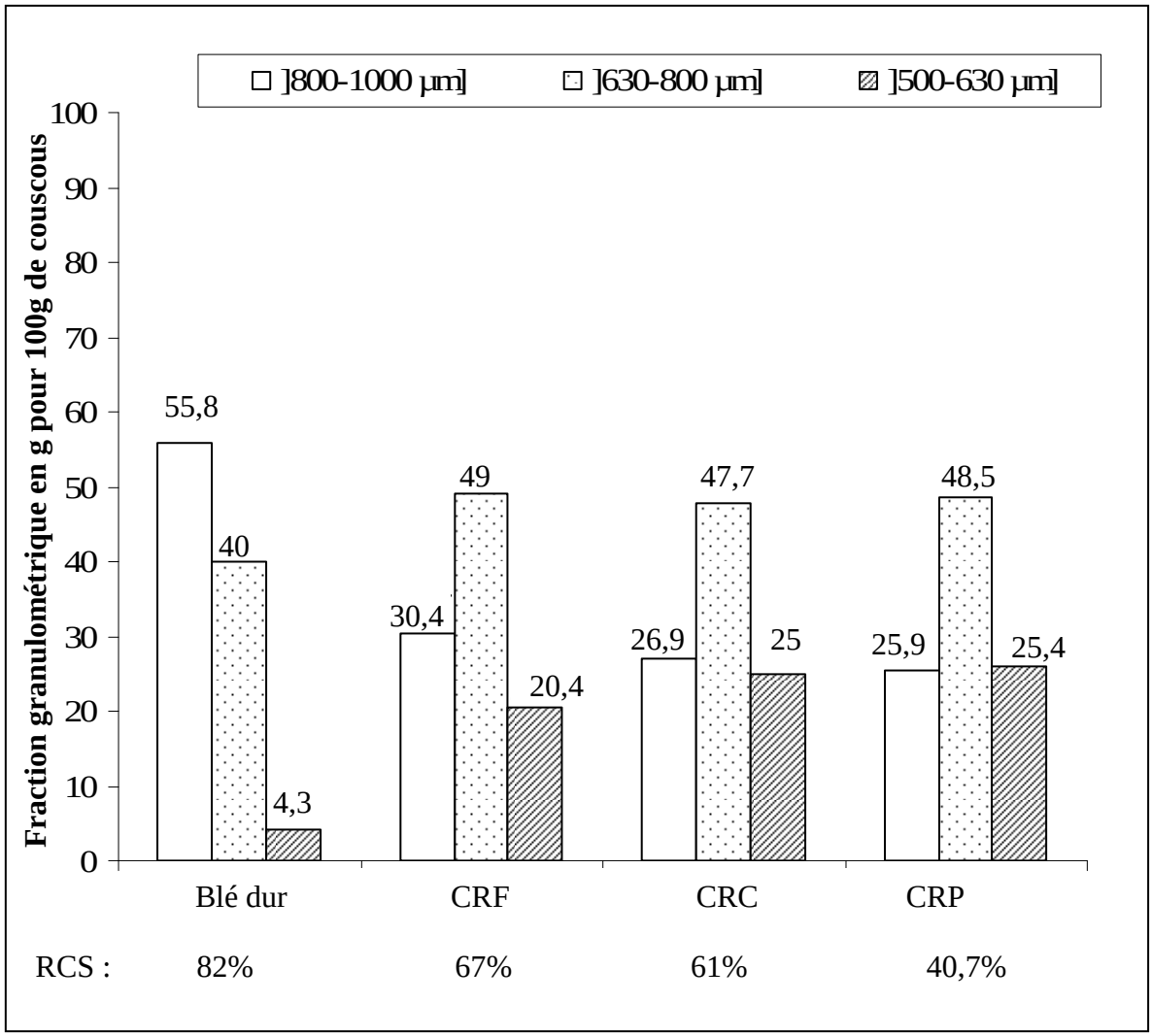


Figure 22. Distribution granulométrique des couscous fabriqués. RCS : Rendement en Couscous Sec, CRF : Couscous Riz-Fèverole, CRP : Couscous Riz-Pois Protéagineux, CRC : Couscous Riz-Pois Chiche.

CRF englobe une forte corrélation positive ($p<0,0001$) entre le rendement en couscous et le niveau en protéines de cette formule. GUEZLANE *et al.* 1986 et ELIAS 1995, soulignent l'importance de la teneur en protéines dans la qualité culinaire de couscous à base de blé durs. Cependant, l'aspect qualitatif des protéines doit être pris en considération. Le rôle de l'amidon dans la bonne tenue des grains devrait être inclus. Le traitement thermique appliqué à la grosse semoule et au couscous final pourrait engendrer une partielle gélatinisation des amidons qui nécessiterait probablement des améliorations.

II. GRANULOMETRIE ET VOLUMES SPECIFIQUES DES COUSCOUS

La distribution granulométrique des couscous fabriqués (Figure 22) montre plus de similitudes entre les trois CSG secs et les distingue du témoin de blé dur par la présence d'une fraction plus importante de fines particules]500-630 µm]. Ceci pourrait indiquer plus de difficultés à l'agrégation des particules des trois formules. La classe granulométrique de]500-800 µm] atteint environ 69 à 74% de la totalité du CSG sec contre seulement 44% dans le couscous témoin. Ainsi, le CRF est le seul couscous qui présente plus de gros grains avec environ 30% de la fraction]800-1000 µm]. Ceci se produit malgré les faibles quantités (1,5%) de la fraction] 630-1000 µm] de la grosse semoule utilisée en début du diagramme de fabrication. D'autre part, de grandes quantités de cette fraction dans le grosse semoule utilisée en début de fabrication (23,36 et 11,55%) respectivement pour le pois chiche et le pois protéagineux n'a pas permis un meilleur niveau d'agrégation et de développement dans la taille des grains de couscous tel qu'observé dans la formule contenant de la fèverole. Nos résultats montrent que l'obtention de plus de couscous ne dépend pas uniquement de la présence de hautes proportions de grosses et moyennes fractions de particules de semoules tel que signalé par DEBBOUZ *et al.* 1994. En plus de ceci, les différences en rendements entre tous les types de couscous fabriqués masquent le fait que la relation granulométrie-développement de la taille des particules (ou grossissement des particules) n'est pas simple et doit inclure d'autres paramètres tel que les propriétés techno fonctionnelles de chaque ingrédient des formules. Les hautes quantités de protéines de FRF pourraient ne pas être le seul facteur important tel que indiqué par TIGROUDJA et BENDJOUDIOUADDA 1999, pour des couscous à base de blé dur où le taux de protéines est inversement proportionnel à la granulométrie. Le bilan de matières de nos fabrications indique que le facteur qui a le plus d'impact sur la granulométrie finale des couscous fabriqués est essentiellement le rapport massique Fs/Gs tout au début du diagramme.

La masse volumique qui exprime une quantité de matière par unité de volume, serait influencée par plusieurs facteurs tels que l'espace inter granulaire et le degré de compacité des granules de couscous (GUEZLANE, 1993). La masse volumique enregistrée pour le couscous témoin de blé dur (Tableau 20) est significativement supérieure à celle des CSG fabriqués ($p < 0,01$). Les chiffres obtenus pour le CT ne diffèrent pas de ceux obtenus par YOUSFI (2002) et DEROUICHE (2002) pour des couscous à base de semoule de blé dur.

Tableau 20. Masses volumiques des couscous fabriqués en (g/ml)

(n = 3)	**CT**	**CRF**	**CRC**	**CRP**
ρ (g/ml)	0,77 ± 0,01	0,69 ± 0,01	0,67 ± 0,01	0,66 ± 0,01

Concernant les CSG, c'est le CRF qui présente la masse volumique la plus élevée ($p < 0,01$) contre des résultats identiques pour les CRC et CRP. Ceci va dans le même sens que les quantités de la fraction de gros couscous]800-1000 µm] obtenue (Figure 22). Comparés aux CSG, le CT serait le plus compact avec les espaces inter granulaires les plus petits.

III. BILAN DE MATIERE ET RENDEMENT

Le bilan de matières étudié correspond à la moyenne de trois fabrications couscoussières. Il a permis l'évaluation du diagramme traditionnel et a mis en évidence la faisabilité technologique et le rendement en couscous pour chacune des trois formules proposées. Le rendement noté pour le témoin de blé dur (82%) est le plus élevé (tableau 21).

Tableau 21. Bilan de matières des couscous fabriqués en accord avec le diagramme traditionnel

(n = 3)	**Blé dur**	**CRF**	**CRC**	**CRP**
Grosse semoule (g)	500	500	500	500
Fine semoule	1048,9 ± 0,5	1250	1250	1250
Eau salée (g)	525,3 ± 0,6	516,4 ± 0,4	517,9 ± 0,2	725,7 ± 1,5
Couscous sec(g)	1270,6 ± 1,2	1177,6 ± 0,5	1064,6 ± 0,5	712,6 ± 0,4
Rendement (%)	82	67,3	60,8	40,7

n : nombre de fabrications, CRF : Couscous Riz-Fèverole, CRC : Couscous Riz-Pois Chiche, CRP : Couscous Riz Pois Protéagineux.

Ce dernier montre que le diagramme traditionnel a engendré une perte de 18% de semoule de blé dur. Habituellement, ce chiffre ne constitue pas de vraies pertes au niveau des ménages car il peut être incorporé pour d'autres préparations alimentaires. Les pertes en matières premières est plus élevé dans le cas des CSG obtenus et montre des différences significatives entre les trois produits ($p<0,0001$). D'autre part, la quantité initiale de fine semoule n'était pas complètement utilisée par le CT (1048,9 g), ce qui a donné un rapport Fs/Gs de 2,1 au lieu de 2,5 tel que prévu. Dans le cas des CSG, la totalité de la fine semoule était consommée, ce qui laisse penser que le rapport Fs/Gs dans le cas des formules proposées doit être révisé. Ceci laisse supposer que le CSG nécessite un rapport Fs/Gs plus important et mériterait d'être clarifié dans de futures investigations.

Le bilan de matières montre que la quantité totale d'eau utilisée lors de la fabrication du CRP est significativement supérieure que celles utilisées pour CRF et CRC et également pour le témoin de blé dur ($p < 0,0001$). La quantité totale d'eau salée nécessaire aux fabrications des CRF et CRC étaient identiques.

Les rendements en couscous des trois formules [(CRF) : 67,28%, (CRC) : 60,83% et (CRP) : 40,71%)] sont significativement ($p<0,0001$) inférieurs à ceux du CT (82%), ce qui est en accord avec les résultats de BOUCHEHAM 2009 dont les rendements en couscous de blé (60%) sont supérieurs à ceux des CSG obtenus selon le même diagramme de fabrication traditionnel. Par ailleurs, tous ses rendements [(CRF) : 43%, (CRC) : 43% et (CRP) : 37%)] sont inférieurs aux nôtres, probablement en rapport avec la ménagère qui les a préparé et qui n'était pas la même.

Malgré le besoin d'investigations en vue d'améliorer le bilan de matières, le niveau de faisabilité reste, cependant, satisfaisant. Les valeurs des rendements notées expriment l'aptitude des particules de légumes secs et de riz à agréger pour former les grains de couscous sous les conditions de roulage.

IV. QUALITE DES COUSCOUS

La qualité des couscous est appréciée à travers la mesure de l'Indice de Gonflement, de la capacité d'absorption d'eau, du Degrés de Désintégration et de l'Indice de Prise en Masse.

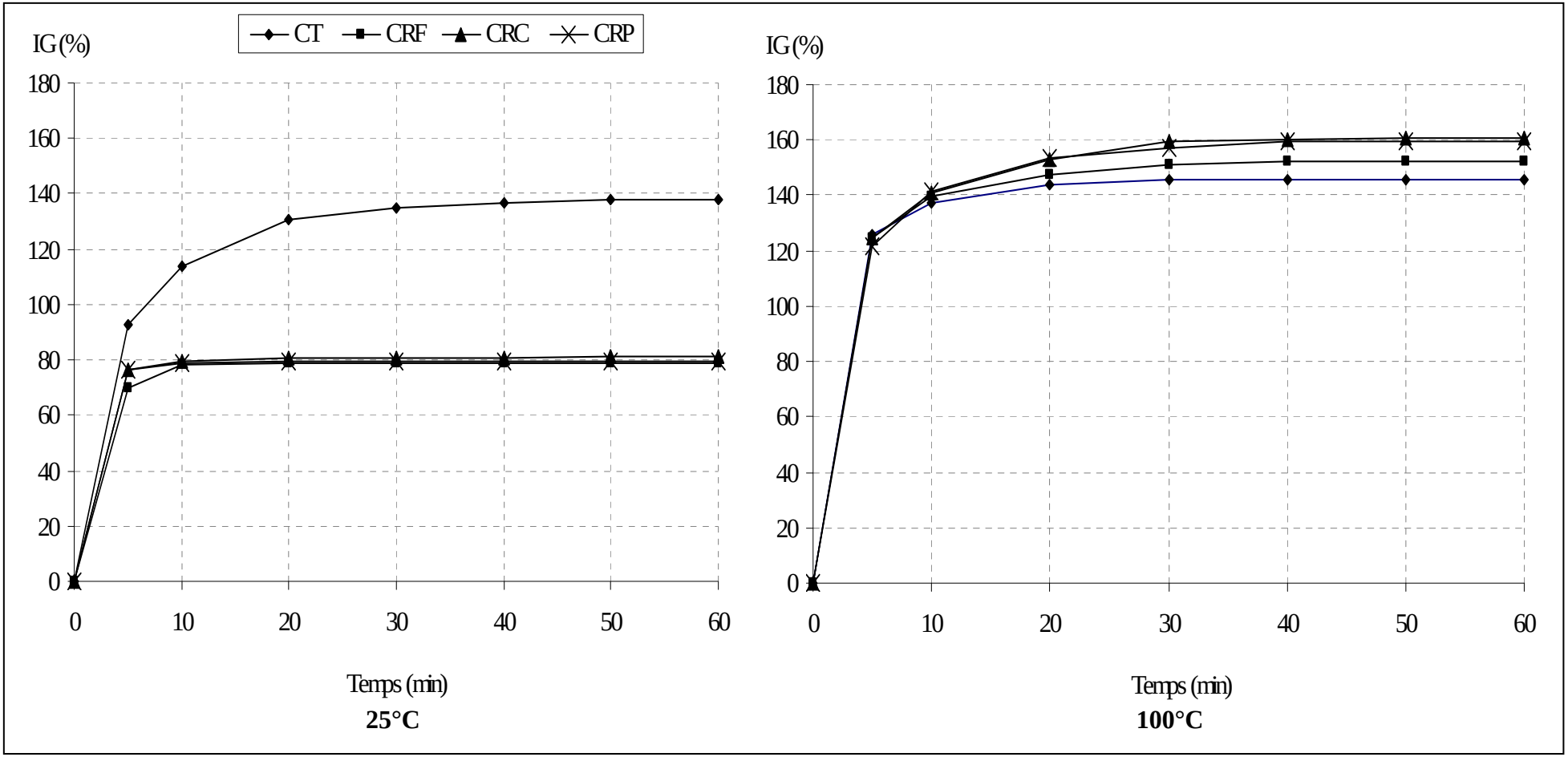


Figure 23. Indice de gonflement (IG) des couscous fabriqués. CT : Couscous Témoin de blé dur, CRF : Couscous Riz-Fèverole, CRC : Couscous Riz-pois Chiche, CRP : Couscous Riz-Pois protéagineux

IV.1. Indice de gonflement (*IG*) et Capacité d'absorption d'eau (*CA*)

Le gonflement dans de l'eau à 25°C des couscous secs obtenus (Figure 23), semble commencer à se stabiliser à 10 min pour les CSG et à 20 min pour le CT après immersion et contact. Aux températures élevées (Figure 23) de gonflement (100°C), tous les couscous atteignent leur maximum après 20 min de contact avec l'eau chaude. A température ambiante (25°C), alors que les CSG stoppent de gonfler à un niveau d'environ 80% (IG = 80), le CT continue à absorber de l'eau pour atteindre un IG d'environ 135%. Tous les CSG absorbent de la même manière l'eau à 25°C.

Par comparaison aux volumes initiaux des couscous secs, nos résultats montrent que le CT peut gonfler jusqu'à 2,3 fois et que les CSG ne peuvent atteindre que 1,8 fois. Le phénomène de gonflement résulte de l'absorption de différentes quantités d'eau par les éléments constitutifs des grains de couscous. Dans ces présentes conditions, les constituants du CT semblent absorber le plus d'eau et gonfler à un niveau supérieur à ceux observés pour les CSG. Ceci pourrait être expliqué essentiellement par la présence de gluten dans le couscous témoin et son absence dans les trois autres types de couscous étudiés. Dans le même sens, DEBBOUZ and DONELLY 1996, ont trouvé que les couscous artisanaux fabriqué à partir de cultivars de blé dur à gluten fort avaient un IG plus élevé que ceux à gluten faible. Ceci serait un bon indicateur et un bon élément de distinction du comportement de plusieurs couscous dans des conditions expérimentales simplifiées. En réalité, le couscous gonfle au cours des opérations de cuisson à la vapeur avant consommation. Ceci se produit traditionnellement dans le "*keskess*" et n'est que le résultat d'un traitement thermique humide et d'opérations d'absorption de vapeur d'eau.

A chaud (100°C), aucune différence significative n'est notée entre le gonflement des couscous étudiés sauf que, malgré l'augmentation de l'absorption des CSG avec la chaleur (154,6%), celle du CT reste au même niveau d'absorption (135%) qu'à 25°C.

Nos résultats qui concernent des couscous non cuits montrent que malgré les taux élevées des CSG en lipides totaux par rapport à ceux du CT de blé dur, aucune différence significative n'est notée dans le niveau de gonflement à 100°C de ces couscous ($p<0,001$). Ceci va dans le même sens que les observations de OUNANE *et al.* 2006 qui soulignent l'absence de corrélations entre le gonflement de couscous cuits et leur contenu en lipides

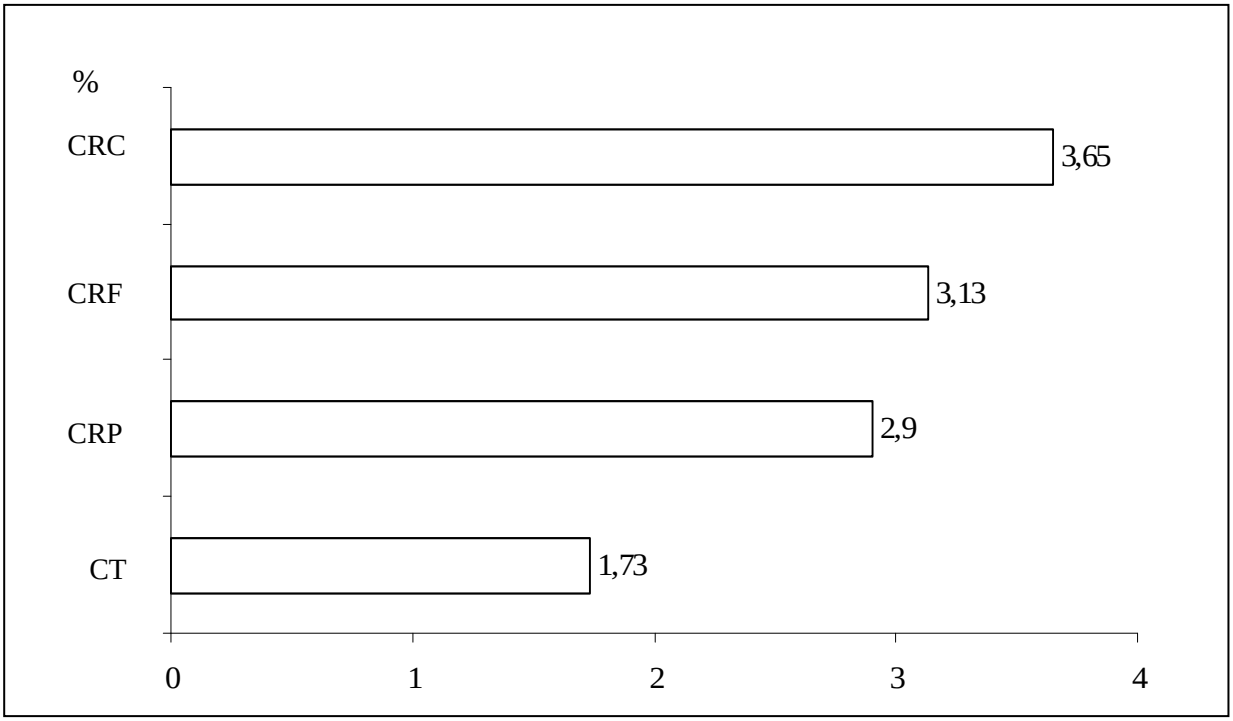


Figure 24. Désintégration des CSG et du CT dans de l'eau à 25°C. CT : Couscous Témoin, CRF : Couscous Riz-Fèverole, CRP : Couscous Riz-Pois protéagineux, CRC : Couscous Riz-pois Chiche

totaux. Contrairement à ceci, ces auteurs ont observé un impact négatif des lipides libres sur les couscous cuits et dans une autre étude sur le gonflement et l'absorption d'eau des pâtes (ADDO and POMERANZ 1992). Ceci serait directement lié au masquage des sites des groupements hydrophiles nécessaires à la fixation des molécules d'eau par ce type de matières grasses.

Les résultats de la réhydratation (CA) des couscous qui se fait à haute température également (100°C), vont dans le même sens que ceux observés pour le gonflement aux mêmes conditions de température. Les *CA* des CSG sont similaires (CRP : 221,04%, CRC : 220,43%) sauf pour le CRF (190,12%) qui absorbe légèrement moins d'eau ($p<0,01$) qu'eux, pour joindre le même niveau d'absorption du CT (178,33%).

IV.2. Degré de désintégration (DD)

D'après GUEZLANE *et al.* 1998, ce serait la diffusion de l'amylose vers la surface des couscous au cours de la cuisson qui serait responsable du collant des particules. Les quantités de fines particules (< 630 µm) perdues lors de l'agitation dans de l'eau à 25°C de couscous cuits à la vapeur révèlent (Figure 24) que les CSG présentent des niveaux de DD (2,9–3,65%) plus élevés ($p<0,01$) que le témoin de blé dur (1,73%).

Les niveaux relativement élevés de DD restent cependant intéressants comparés à ceux enregistrés dans la littérature (4,62-6,16%) pour des couscous artisanaux de blé dur (GUEZLANE *et al.* 1986 ; YETTOU *et al.* 2000). Ceci semble converger en général avec les différences enregistrées dans les rendements en couscous. Par ailleurs, les valeurs des DD des CSG ne coïncident pas avec la distribution granulométrique des grains de chaque couscous. Ainsi, le CRF qui présente environ 20% de la fraction] 500-630 µm] et le meilleur rendement (67%), se désintègre plus que le CRP qui contient 25% de la même classe de taille de grains avec seulement 40% de rendement.

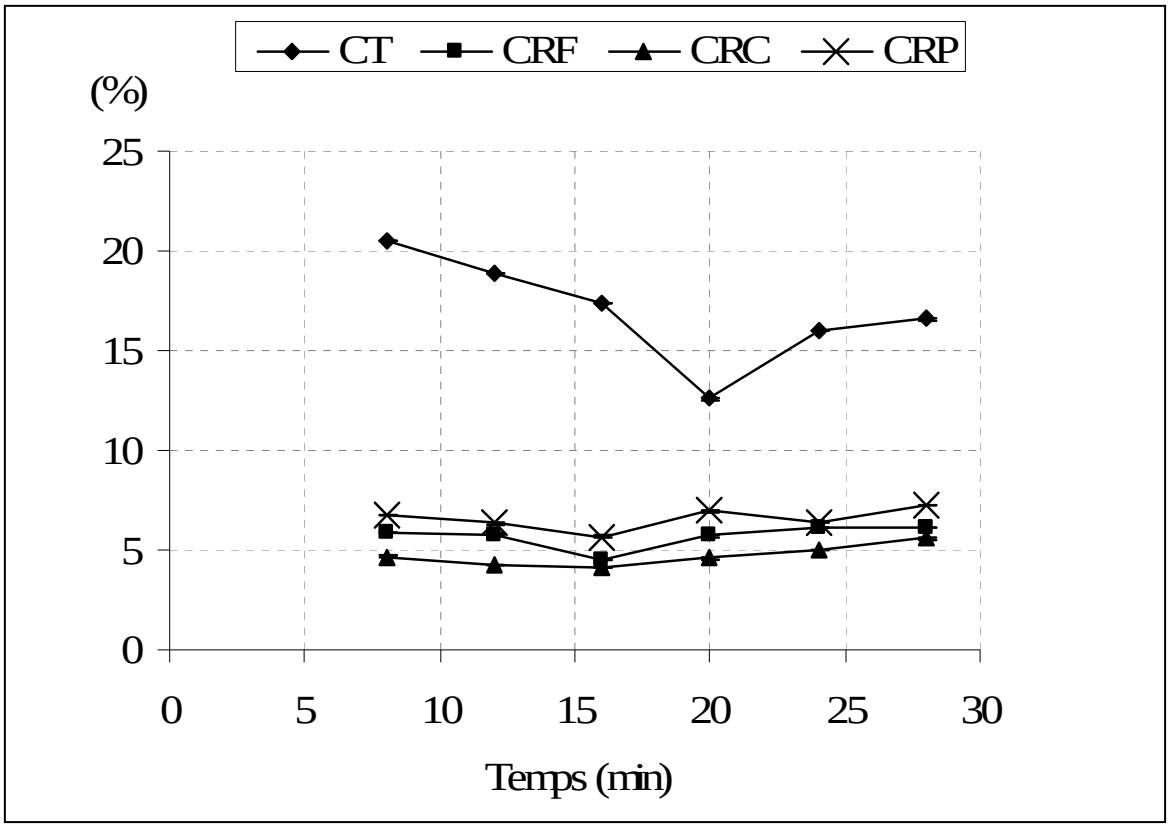


Figure 25. Indice de Prise en Masse (*IPM*) des couscous étudiés. CT : Couscous Témoin, CRF : Couscous Riz-fèverole, CRC : Couscous Riz-pois Chiche, CRP : Couscous Riz-pois Protéagineux.

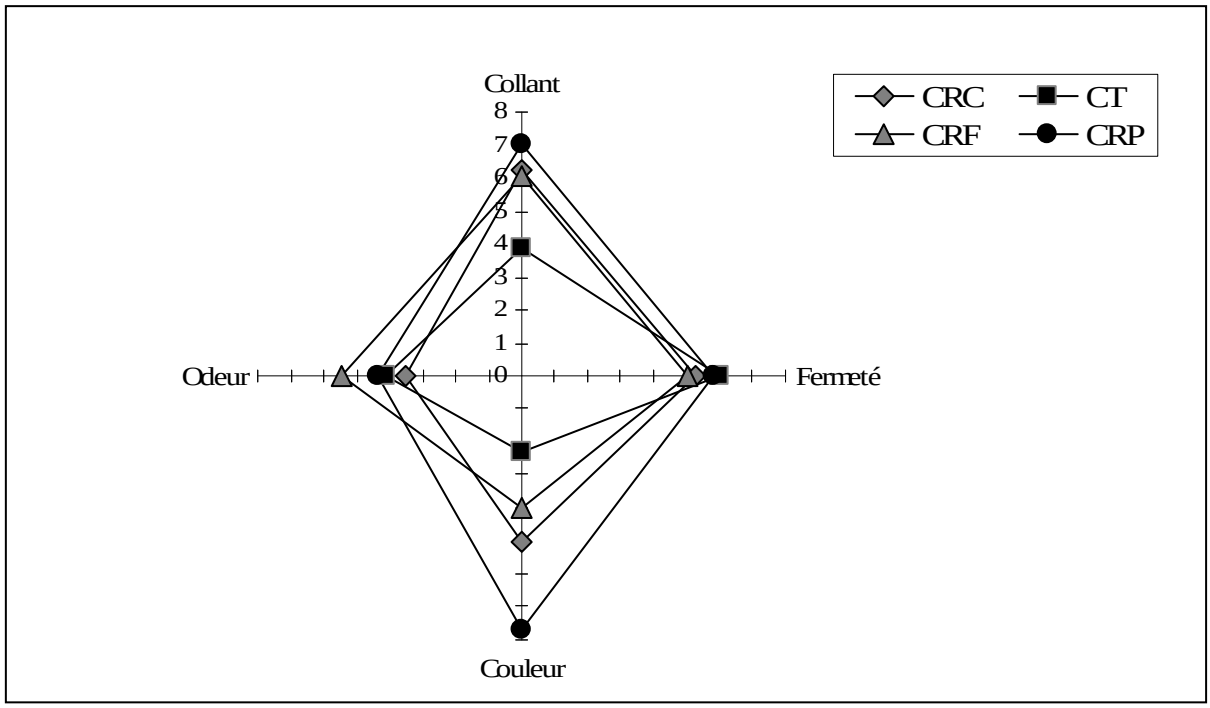


Figure 26. Classification par rang de *Friedman* de différents couscous fabriqués. CT : Couscous témoin de blé dur, CRF : Couscous Riz-Fèverole, CRP : Couscous Riz-Pois protéagineux, CRC : Couscous Riz-pois Chiche.

IV.3. Indice de Prise en Masse (IPM)

Alors que le collant s'améliore pour le CT (Figure 25), pour atteindre son optimum correspondant au minimum d'*IPM à* 20 min, Il semble que les CSG prennent en masse à 16 min bien avant le CT.

V. CARACTERISTIQUES SENSORIELLES DES COUSCOUS

Le test de classification par rang de *Friedman* permet l'arrangement des échantillons testés (CSG, couscous témoin de blé) pour chaque descripteur. Cette classification est représentée dans la figure 26. Le calcul de la valeur *F* de *Friedman* pour chaque descripteur montre une différence significative entre tous les échantillons testés ($p < 0,01$). Les différences entre les trois CSG et le CT sont plus importantes pour le collant et la couleur que pour l'odeur et la fermeté. Les CSG semblent en général plus collants et plus colorés que le CT. Pour le critère du collant, tous les CSG étudiés montrent une moindre qualité vis à vis du témoin de blé dur qui semble être de loin le moins collant suivi par le CRF, CRC et puis par le CRP. L'intensité de couleur des CSG augmente selon l'ordre suivant : CRF, CRC puis CRP. Cette supériorité de couleur des CSG est probablement cause par la forte coloration de chaque légumineuse malgré leurs faibles proportions dans les formules proposées. Les CSG semblent être légèrement moins fermes que le témoin de blé dur et sont classés par ordre croissant comme suit : CRF, CRC puis CRP. Le descripteur de l'odeur classe le CRC comme le couscous le moins odorant. Par ailleurs, les CRF et CRP semblent avoir une odeur intense, qui serait supérieure même à celle du témoin de blé dur.

Le CRF se rapproche le plus donc du CT à travers le collant et la couleur alors que le CRP s'apparente au couscous témoin à travers sa fermeté et sa couleur. Les similarités CRP-CT semblent être corroborées par les résultats de classification du DD.

La comparaison basée sur la base des rapprochements des CSG au Couscous témoin classent les formules étudiées comme suit : FRPC en deuxième position suivie de la FRPP en première position par rapport à la fermeté et l'odeur et la FRF également en première position mais cette fois ci par rapport au collant et à la couleur. Par ailleurs, étant donné que les différences d'intensités sont plus petites à celles notées pour le collant et la couleur, La FRF ne peut pas être en première position. Les préférences du jury de dégustation confirment ceci et classent les trois CSG avec le CRF comme le meilleur couscous après le CT suivi par le CRC puis par le CRP.

La considération des résultats de la classification par rang de *Friedman* qui étaient confirmés par les préférences des dégustateurs place le CRF comme le meilleur couscous après le couscous témoin de blé dur suivi du CRC puis du CRP.

Dans les traditions populaires, les sauces, le lait ou autres accompagnements sont souvent ajoutées au couscous pendant ou juste avant sa consommation. Ceci exprime différentes préférences et pourrait permettre une meilleure acceptation du produit malgré les différences enregistrées entre les CSG étudiés.

Conclusions

Le diagramme traditionnel de fabrication de couscous pratiqué dans le Nord Est algérien testé dans ce travail montre une faisabilité technologique relativement bonne. Cette faisabilité, accompagnée des avantages de la supplémentation céréales-légumes secs place les couscous fabriqués lors de la présente étude à un niveau nutritionnel meilleur que celui des produits mis sur le marché local. Les présents résultats sont l'expression de plus de possibilités de fabrication et de diversification à saisir aussi bien au niveau ménager qu'à plus grande échelle.

Les couscous sans gluten (CSG) obtenus affirment donc la faisabilité technologique recherchée en objectif mais présentent quelques insuffisances par rapport au témoin car s'agissant de premiers résultats donnés à l'issue d'un diagramme qui a été imposé aux formules et dont les étapes ou leurs conditions de déroulement méritent d'être mieux adaptées.

La comparaison de l'aptitude des trois formules à donner du couscous entre elles et avec le témoin a permis de noter les quelques ressemblances ou différences utiles pour la poursuite de l'investigation dans le sujet :

- Sur le plan de leurs capacités à gonfler et à absorber l'eau, les CSG gonflent à 25°C moins que le CT pour le rejoindre au même niveau à 100°C. Les résultats de la CA (100°C), vont dans le même sens que ceux de l'IG sauf pour le CRF qui absorbe moins d'eau que les CSG et rejoint de ce fait le CT. Mis à part le CRP qui se délite plus, les couscous étudiés ont le même niveau de DD. Nos CSG sont de bonne qualité puisqu'ils perdent moins de matières sèches que les couscous du commerce de blé dur et de fabrication artisanale (GUEZLANE *et al.* 1986 ; YETTOU *et al.* 2000) mais, sans étape de précuisson des matières premières. Le s Indices de Prise en Masse restent inférieurs à celui du témoin.

- Au niveau rendement de fabrication, la FRF présente le meilleur résultat des CSG. Ce rendement considéré comme satisfaisant reste, cependant, moindre que celui du Couscous témoin de blé dur. La facilité d'agrégation des différents ingrédients de la FRF est indiquée par la présence d'une fraction plus importante de gros couscous dans le CRF. C'est avec cette formule qu'il semble y avoir le plus de similitudes dans l'aspect du produit fini par rapport au CT. Les grains semblent avoir des aspects plus lisses et homogènes contrairement à ceux des CRC et CRP.

Références bibliographiques

ABECASSIS, J. et FEILLET, P. 1995. Pureté des semoules de blé dur ? taux de cendres. *Ind. Céréales.*, **36** : 13-18.

ABOUBACAR, A. and HAMAKER, B. R. 1999. Physicochemical Properties of Flours that Relate to Sorghum Couscous Quality. *Cereal Chem*. **76** : 308-318.

ABOUBACAR, A. and HAMAKER, B. R. 2000. Low molecular weight soluble starch and its relationship with sorghum couscous stickness. *Journal of Cereal Science,* **31** : 119-126.

ADDO, K. and POMERANZ, Y. 1992. Effects of lipids and emulsifiers on alveograph characteristics. *Cereal chem,* **69** : 6-12.

ALUKA, K., MICHE, J. C. et FAURE, J. 1985. Conditions d'une fabrication mécanique du couscous de maïs en Afrique de l'ouest. *Ind. Agric. Alim.* : 457-461.

ANONYME. 1995. Contrôle de la qualité des produits alimentaires. *Recueil des normes françaises,* 5ème édition, AFNOR, Paris : 400 p.

BADAOUI, D. 1984. Influence du séchage sur la qualité du couscous industriel. Mémoire d'ingénieur. INA, El Harrach, Alger : 74 p.

BAHCHACHI, N. 2002. Incorporation de gluten de maïs dans la fabrication de deux produits céréaliers traditionnels : *Trida* et *Couscous*. Mémoire de Magister, Option Nutrition et Technologie Alimentaire, *I.N.A.T.A.A.,* Constantine, Algérie :134 p.

BARNES, P. J., DAY, K. M. and SCHOFIELD, J. D. 1981. Commercial pasta manufacture changes in lipid binding during processing of durum wheat semolina. *Z. Lebensen. Unters. Foch.*, **172** : 373-376.

BENATALLAH, Le., AGLI, A. et ZIDOUNE, M. N. 2008. Gluten-free couscous preparation : traditional diagram description and technological feasibility for three rice-leguminous supplemented formulae. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, **6** : 105-112.

BOUCHEHAM N. 2009. Aptitude technologique de trois formules à base de riz pour la fabrication de couscous sans gluten. Mémoire de Magister, Option Biochimie et Technologie Alimentaire, *I.N.A.T.A.A.,* Constantine, Algérie :103 p.

BOUDREAU, A et MENARD, G. 1992. Le blé- Eléments fondamentaux et transformation. *DOMINI, 4ème trimèstre*, Canada : 493 p.

BOYACIOGLU, M. H. and UNAL, S. 1992. Effect of particle size on mineral constituents and pigments content of semolina. *Pasta. J.*, **74** : 40-44.

CUBADDA, R., CARCEA, M. and PASQUI, L. A. 1992. Suitability of the gluten index test for assessing gluten strength in durum wheat and semolina. *Cereal Food World*, **37**, : 866-869.

CUQ, B. and ABECASSIS, J. 2006. Effects of semolina composition and processing conditions on couscous quality. *World Grains Summit Symposium : Foods and Beverages*, 17-20 September, San Francisco, USA.

DAMIDAUX, R. and FEILLET, P. 1978. Relation entre les propriétés viscoélastiques du gluten cuit, la teneur en protéines et la qualité culinaire des blés durs. *Ann. Technol. Agric,* **27** : 799-809.

DEBBOUZ, A., DICK, J. W. and DONNELLY, B. J. 1994. Influence of raw material on couscous quality. *Cereal Foods World*. **39** : 213-236.

DEBBOUZ, A. and DONNELLY, B. J. 1996. Process Effect on Couscous Quality. *Cereal Chem*. **73** : 668-671.

DEROUICHE, M. 2003. Couscous : Enquête de consommation a Constantine, fabrication artisanale et qualité. Mémoire de Magister, Option Nutrition Humaine, *I.N.A.T.A.A.,* Constantine, Algérie :125p.

DEXTER, J. E. et MATSUO, R. 1978. Effect of semolina extraction rate on semolina characteristics and spaghetti quality. *Cereal Chem.* **55** : 841-852.

DEXTER, J. E., MATSUO, R. R. and MORGAN, B. C. 1983. Spaghetti stickiness : some factor influencing stickiness and relationship to other cooking quality characteristics. *J. Food Sci*. **48** : 1545-1551.

F.A.O. 1995. Norme codex pour le couscous, *CODEX STAN 202* : 4 p.

F.A.O. 1996. *Codex Alimentarius* : Céréales, legumes secs, légumineuses , produits dérivés et produits végétaux, F.A.O., **7**, *2ème édition*, Rome : 164 p.

FEILLET, P. 1984. The biochemical basis of pasta cooking quality. Its consequences for durum wheat breeders. *Sci. Aliments*, **4** : 555-566.

FEILLET, P. 2000. Le grain de blé, composition et utilisation. *Institut national de la recherche agronomique*, INRA, Paris : 308 p.

GALIBA, M., ROONEY, L. W., WANISKA, R. D. and MILLER, F. R. 1987. The Preparation of Sorghum and Millet Couscous in West Africa. *Cereal Food World*. **32** : 878-884.

GALIBA, M. WANISKA, R. D., ROONEY, L. W. and MILLER, F. R. 1988. Couscous of sorghum with different Kernel Characteristics. *Journal of Cereal Science*, **7**: 183-193.

GUEZLANE, L. et ABECASSIS, J. 1991. Méthodes d'appréciation de la qualité culinaire du couscous de blé dur. *Ind. Alim. Agr*, **11** : 966-971.

GUEZLANE, L. et SENATOR, A. 1985. Etude physico-chimique et technologique de deux types de couscous : artisanal et industriel. *Ann. INA*-Alger, **9** : 47-62.

GUEZLANE, L. 1993. Mise au point de méthodes de caractérisation et étude des modifications physico-chimiques en vue d'optimiser la qualité de couscous de blé dur. Thèse de Doctorat.d'Etat, *I.N.A.*, El Harrach, Algérie : 89p.

GUEZLANE, L. SELSELET-ATTOU, G. et SENATOR, A. 1986. Etude comparée de couscous de fabrication industrielle et artisanale. *Industries des céréales*, **43** : 25-29.

GUEZLANE, L., COLONNA, P. and ABECASSIS J. 1998. Effet du traitement hydrothermique du couscous de blé sur les modifications physiques de l'amidon. *Ann. INA El Harrach*, **19** : 62-81.

HAL, F. 2000. Le livre du couscous, *Stock* Editions : 156 p.

HEBRARD, A., OULAHNA, D., GALET, L., CUQ, B., ABECASSIS, J. and FAGES, J. 2003. Hydration properties of durum wheat semolina : influence of particle size and temperature. *Powder Technology*, **130** : 211-218.

IDIR D. 2000. Influence du taux d'extraction et de la granulométrie de la semoule sur la qualité technologique du couscous de blé dur. Thèse de Magister . I.N.A. El Harrach, Alger :84 p.

KAUP, S. M. and WALKER, C. E. 1986. Couscous in North Africa. *Cereal Food World*. **31** : 179-182.

KHENDEK, D. et GUEZLANE, L. 1998. Rôle des monoglycérides dans l'expression de la qualité technologique du couscous industriel de blé dur. *CéréaliCulture*, **32** : 10-14.

KOBREHEL, K. et FEILLET, P. 1998. Influence de la température de séchage alimentaires sur l'activité et la composition des peroxydases en relation avec la couleur des produits. *Lebensen Wiss.*, V. Technom., **18** : 227-228.

LAINGNELET, B., KOBREHEL, K. et FEILLET, P. 1972. Le problème de coloration des pâtes alimentaires. *Ind. Alim. Agric.*, **89** : 413-427.

MATSUO, R. R., DEXTER, J. E., BOUDREAU, A., and DAUN, J. K. 1986. The role of lipids in determining spaghetti cooking quality. *Cereal Chem*. **63**:484-489.

MOHOUB, H. et RABAA, C. 2003. Les aventures du couscous. *Editions Actes du Sud*, Collection l'Orient Gourmand : 240 p.

N'DIR, B. et GNING., R. D. 1989. Etude de deux procédés de fermentation traditionnelle de couscous de mil (*Pennisetum typhoides*). *Céréales des régions chaudes.* AUPELF-UREF, *Eds John Libbey Erotext,* Paris : 265-272.

NDONG, M., WADE. S., DOSSOU. N., GUIRO. A. T. et DIAGNE GNING. R. 2007. Valeur Nutritionnelle Du *Moringa Oleifera,* Etude de la biodisponibilité du fer, effet de l'enrichissement de divers plats traditionnels sénégalais avec la poudre des feuilles. *African Journal of Food Agriculture and Development*. **7** : 17 p.

OUNANE, G., CUQ, B., ABECASSIS, J., YESLI, A. and OUNANE, S. M. 2006. Effect of physicochemical Charachteristics and Lipid Distribution in Algerian Durum Wheat Semolinas on the Technological Quality of Couscous. *Cereal Chem.* **83** : 377-384.

ROUSSET, M. et LOISEL, W. 1984. Tests de laboratoire *In :* Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales. GODON B. & LOISEL W. *Tec. et Doc. Lavoisier,* Paris : 467-509.

SENATOR, A. 1983. Contribution à l'étude de la valeur couscoussière. Comparaison entre deux processus de fabrication. Mémoire d'ingénieur. INA, El Harrach, Alger : 100 p.

TIGROUDJA F. et BENDJOUDIOUADDA A. 1999. Influence de la granulométrie de la semoule sur la qualité technologique du couscous (artisanal) de blé dur. Mémoire d'ingénieur INA, El Harrach, Alger : 85p.

TRENTESEAUX, E. 1993. Evaluation de la qualité du blé dur *In :* Durum wheat quality in the mediterranean region. Option méditéranéenne. **DIFONZO, N., KANNE, F. et NACHIT, M.** Série A : Séminaire Méditérannéen, Zarragoza 17-19 novembre 1993, CIHEAM/ICARDA/CIMMYT, Zarragoza : 284 p.

VODOUHE, S. R., ZANNOU, A. et ACHIGAN DAKO, E. 1998. Actes du premier atelier sur la diversité génétique du fonio (*Digitaria exilisStapf.*) en Afrique de l'Ouest. IPGRI, Conakry, Guinée, 1998 : 81p.

YETTOU, N., AÏT KACI, M., GUEZLANE, L. et AÏT AMMAR, H. 1997. Détermination des caractéristiques viscoélastiques du couscous cuit au moyen du viscoélastographe Chopin. *Ind. Alim. Agr,* **12** : 844-847.

YETTOU, N., GUEZLANE, L. et OUNANE, G. 2000. Mise au point d'une méthode instrumentale d'évaluation de la délitescence du couscous de blé dur. *Actes du 1er Symposium de blé : Enjeux et stratégie,* Alger, 7-9 février 2000, OAIC : 271-275.

YOUSFI, L. 1984. Etude de la stabilité du couscous industriel. Mémoire d'ingénieur. INA, El Harrach, Alger : 104 p.

YOUSFI, L. 2002. Influence des conditions de fabrication et des modes de préparation sur la qualité du couscous industriel et artisanal. Mémoire de Magister, Option Nutrition et Technologie Alimentaire, *I.N.A.T.A.A.,* Constantine, Algérie :141 p.

Production scientifique

BENATALLAH, Le., AGLI, A. et ZIDOUNE, M. N. 2006a. Traditional manufacturing of gluten free couscous : technological feasibility of three elaborated formulae with rice supplemented with leguminous. IUFOST XIIIth congress Food is Life, Nantes, France, 17-21 September, *CD of proceeding.*

BENATALLAH, Le., OULAMARA, H., AGLI, A et ZIDOUNE, M. N. 2006b. Formulation et fabrication de couscous a base de riz et de légumes secs pour malades cœliaques. Actes SAR GP3A, TUNIS : 160-164.

BENATALLAH, Le., A. AGLI, et ZIDOUNE M. N. 2008a. Faisabilité technologique et aptitudes culinaires de trois formules a base de riz et de légumes secs pour la fabrication de couscous sans gluten pour malades cœliaques. *Actes du séminaire international sur la biotechnologie au service du secteur agroalimentaire.* Tipaza les 17 – 18 juin 2008. Numéro Spécial. Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie. *Siba :* 55 -61.

BENATALLAH, Le., AGLI, A. et ZIDOUNE, M. N. 2008b. Gluten-free couscous preparation : traditional diagram description and technological feasibility for three rice-leguminous supplemented formulae. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, **6** : 105-112.

BENATALLAH, Le., AGLI, A. et ZIDOUNE, M. N. 2008c. Gluten free couscous with rice and leguminous : particle development and productivity according to a traditional manufacturing diagram of the east of algeria. The First International Conference on Food Industries and Biotechnology and Associated Exhibition, 25-27 november, Homs SYRIA, *CD of proceeding.*

Partie 4. COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES PATES : APTITUDES A LA PANIFICATION DE LA FORMULE RIZ-FEVEROLE

Sommaire Partie 4

Introduction..... 83

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-PAIN ET PANIFICATION..... 83
I.1. Pétrissage..... 83
I.2. Fermentation..... 84
I.2.1. Réaction de base..... 84
I.2.2. Résultats de la fermentation..... 84
I.3. Cuisson..... 85
I.3.1. Expansion au four..... 85
I.3.2. La transition pâte/mie..... 86
II-PATES BOULANGERES ET CRITERES DE QUALITE..... 87
II.1. Importance des propriétés techno-fonctionnelles des constituants impliqués..... 88
II.2. Caractères rhéologiques des pâtes..... 89
II.2.1. Propriétés texturales.par compression biaxiale en conditions lubrifiées : Squeezing flow..... 89
II.2.2. Propriétés viscoélastiques en régime dynamique..... 90
II.2.3. Valeur boulangère par1'Alvéographe Chopin..... 91
II.3. Microstructure de la pâte..... 92
II.3.1. Observations par microscopie électronique..... 92
II.3.2. Observations par microscopie optique..... 93
II.3.2.1. Vues en lumière directe et microscopie en contraste de phase..... 93
II.3.2.2. Vues par Microscopie Confocale à Balayage Laser (MCBL)..... 94
III. QUALITE DES PRODUITS DE PANIFICATION..... 96
III.1. Propriétés mécaniques..... 96
III.2. Structure alvéolaire de la mie..... 96
III.3. Propriétés organoleptiques..... 97
IV. CAS DE LA PANIFICATION SANS GLUTEN..... 98
IV.1. Propriétés viscoélastiques..... 100
IV.2. Microstructure de pâtes..... 100

MATERIEL & METHODES

I. MATIERES IMPLIQUEES..... 102
I.1. L'eau d'hydratation..... 102
I.2. La levure boulangère..... 102
I.3. L'HPMC..... 102
I.4. Le sel..... 102
I.5. Les semoules de blé dur, farines de blé tendre et ingrédients exempts de gluten..... 102
II. MATERIEL DE PANIFICATION..... 103
II.1. Les pétrins..... 103
II.2. Les moules..... 103
II.3. Les fours..... 103
III. LE PLAN D'EXPERIENCE..... 104
III.1. Modèle mathématique..... 104
III.2. Niveaux des variables..... 105
III.3. Détermination des variables réelles..... 106
III.3.1. L'HPMC..... 106
III.3.2. L'hydratation..... 106

IV. OBTENTION DES PATES ET PREPARATION DES ECHANTILLONS..... 106
V. CARACTERISATION DES PATES..... 107
V.1. Microscopie confocale à balayage laser..... 107
V.1.1. Principe..... 107
V.1.2. Mode opératoire..... 108
V.1.3. Expression des résultats..... 109
V.2. Propriétés mécaniques des pâtes par compression biaxiale en conditions lubrifiées : Squeezing flow..... 109
V.2.1. Principe..... 109
V.2.2.Mode opératoire..... 109
V.2.3. Expression des résultats..... 110
V.3. Propriétés viscoélastiques en régime dynamique..... 111
V.3.1. Principe..... 111
V.3.2.Mode opératoire..... 111
V.3.3. Expression des résultats..... 112
V.4. Propriétés boulangères par l'Alvéographe Chopin..... 112
V.4.1. Principe..... 112
V.4.2. Choix des pâtes à tester..... 112
V.4.3. Mode opératoire..... 114
V.4.4. Expression des résultats..... 114
VI. ETUDE DES PROCESSUS DE FERMENTATION ET DE CUISSON..... 115
VI.1. Suivi de l'expansion gazeuse lors de la fermentation..... 115
VI.1.1. Suivi du volume spécifique au mesureur de pousse..... 115
VI.1.1.1. Principe 115
VI.1.1.2. Mode opératoire..... 116
VI.1.1.3. Expression des résultats..... 116
VI.1.2. Suivi du volume spécifique et de la structure après fixation par congélation et lyophilisation..... 116
VI.1.2.1. Principe..... 116
VI.1.2.2. Mode opératoire..... 117
VI.1.2.3. Expression des résultats..... 117
VI.2. La cuisson 118
VI.2.1. Tests de panification..... 118
VI.2.2. Suivi de la cinétique d'expansion et de perte de poids au four..... 118
VII. CARACTERISATION DES PAINS OBTENUS..... 119
VII.1. Mesure des volumes spécifiques des pains..... 119
VII.1.1. Principe..... 119
VII.1.2. Mode opératoire..... 119
VII.1.3. Expression des résultats..... 120
VII.2. Propriétés mécaniques des la mie par le test de compression/relaxation au TA.XT2i..... 120
VII.2.1.Principe..... 120
VII.2.2. Mode opératoire..... 120
VII.2.3. Expression des résultats..... 120
VII.3. Analyse de la texture de la mie..... 121
VII.3.1.Principe de la morphologie mathématique..... 121
VII.3.2. Mode opératoire..... 122
VII.3.3. Expression et classement des résultats..... 122
VIII. CARACTERISATION SENSORIELLE DES PAINS..... 124
IX. ANALYSE STATISTIQUE..... 126

RESULTATS & DISCUSSION

I. CHOIX DE LA FORMULE A TESTER EN PANIFICATION PAR L'ALVEOGRAPHE CHOPIN..... 127
II. EXPLOITATION DES SURFACES DE REPONSES..... 129
II.1. Confirmation de l'ajustement du plan d'expérience..... 129
II.2. Propriétés viscoélastiques des pâtes en fonction des niveaux *"HPMC-Eau"*..... 129
II.3. Propriétés mécaniques des pâtes..... 131
II.4. Optimisation..... 132
II.5. Validation des résultats de l'optimisation..... 132
II.5.1. Cinétiques de fermentation..... 133
II.5.2. Microstructure des pâtes..... 137
II.5.3. Propriétés rhéologiques des pâtes des points de vérification..... 140
II.5.3.1. Propriétés Alvéographiques..... 140
II.5.3.2. Propriétés viscoélastiques..... 142
II.5.4. Tests de panification..... 144
II.5.4.1. Perte d'eau au cours de la fermentation et la cuisson..... 145
II.5.4.2. Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image et classification des PSG par ACP..... 147
II.5.4.3. Propriétés mécaniques des mies..... 149
II.5.4.4. Caractérisation sensorielle des pains..... 149

Conclusions..... 151
Références bibliographiques..... 153
Production scientifique..... 160

Liste des tableaux

Tableau 22. Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à 2 variables..... 105
Tableau 23. Valeurs calculées des variables codées correspondant aux niveaux attribués.. 106
Tableau 24. Pâtes préparées pour la caractérisation des propriétés boulangères à l'Alvéographe Chopin..... 113
Tableau 25. Pains choisis pour le test de classification par rang de *Friedman*..... 125
Tableau 26. Descripteurs sensoriels décrivant la texture et l'aspect général des pains sans gluten retenus pour le test de Friedman..... 125
Tableau 27. Caractéristiques alvéographiques des farines de blé tendre, de matières premières et formules exemptes de gluten..... 127
Tableau 28 : Test d'analyse de la variance des paramètres de traçage des surfaces de réponses des pâtes de la formule Riz-Fèverole..... 129
Tableau 29. Couples HPMC-Hydratation représentatifs des domaines optima et hors domaines optima après optimisation par MSR de PSG de la FRF..... 133
Tableau 30. Caractéristiques alvéographiques des farines de blé tendre, de matières premières et formules exemptes de gluten..... 141
Tableau 31. Propriétés viscoélastiques des points de vérification de l'optimisation de l'ajout d'HPMC à la FRF approché par MSR..... 143
Tableau 32. Perte d'eau des PSG fabriqués à partir des couples HPMC-Hydratation issus des domaines optima..... 145

Liste des figures

Figure 27. Schématisation de l'évolution de la taille et de la forme des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation..... 85
Figure 28. Représentation schématique des mécanismes de (1) diffusion du CO2, (2) diffusion de l'eau liquide, (3) évapo-condensation et (4) expansion des gaz 85
Figure 29. Evolution de la structure d'un grain d'amidon au cours d'un traitement hydro-thermique en excès d'eau..... 86
Figure 30. Evolution de la viscosité apparente de la pâte en fonction de la température de cuisson..... 87
Figure 31. Extension biaxiale par compression en conditions lubrifiées..... 90
Figure 32. Interprétation des résultats de l'Alvéographe Chopin selon les réglementations Française et Algérienne..... 91
Figure 33. Alvéogrammes de deux pâtes à base de blé dur : (a) : pâte forte, (b) : pâte faible..... 91
Figure 34. Imagerie d'une pâte fermentée obtenue par microscopie électronique à transmission..... 92
Figure 35. Observations par microscopie en lumière directe de la microstructure d'une cryo-section d'une pâte fermentée (a) et d'un échantillon de mie..... 93
Figure 36. Observations par microscopie en lumière directe de mies de pains fabriqués avec de la farine de blé (a) et de seigle (b)..... 94
Figure 37. Image tridimensionnelle d'un réseau protéique entourant les bulles gazeuses dans une pâte céréalière à base de blé obtenue par MCBL..... 94
Figure 38. Microscopie Confocale à Blayage Laser (MCBL) : (a) : marquage des lipides polaires, (b) : marquage des gliadines, (c) : Superposition des deux images..... 95
Figure 39. Observation par MBCL d'une pâte avec un émulsifiant du commerce..... 95
Figure 40. Localisation des lipides polaires (L) aux alentours des bulles gazeuses dans une matrice protéique par MBCL..... 95

Figure 41 Observations en microscopie confocale (×40) d'une pâte à 2% de saccharose, 10% d'huile de colza et 55% d'eau..... 95
Figure 42. Courbe typique de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation lors de la compression d'une mie de cake..... 96
Figure 43 Grille de présentation des résultats de l'essai de panification..... 97
Figure 44 (a-b). Variation des modules élastique (G') et visqueux (G") en fonction de la fréquence pour des pâtes à base de farines de blé tendre, de mélange avec du riz long et court..... 100
Figure 45. Observations par MCBL de mies de pains sans gluten à base de Blé Noir et Brun..... 100
Figure 46. Observations par MBCL de mie de pain de blé tendre, de mie de pain sans gluten du Commerce, de mie de pain sans gluten sans ajout de lait écrémé et de mie de pain sans gluten additionné de lait écrémé marqués avec de la Safranine O dye..... 101
Figure 47. Observations par MBCL de mies de PSG marqués avec de la Safranine O dye. sans TGase et avec 1 U TGse/g de protéine..... 101
Figure 48. Illustration du matériel utilisé en panification et pour le suivi de la perte de poids au four..... 102
Figure 49 : Représentation graphique du plan expérimental à deux facteurs et trois niveaux..... 105
Figure 50. Diagrammes montrant les différentes voies d'acheminement des pâtes vers les analyses visées..... 106
Figure 51. Schéma de principe de la MCBL..... 107
Figure 52. Microscope confocale à balayage laser..... 109
Figure 53. Schéma de principe de compression à volume de pâte constant en conditions lubrifiées..... 109
Figure 54. La Force en fonction du temps de compression sur des pâtes à pain..... 110
Figure 55. Illustration du domaine de linéarité des pâtes étudiées à une fréquence fixe de 10 Hz pour le témoin de blé tendre et une pâte sans gluten..... 111
Figure 56. Mise en place de l'échantillon dans l'entrefer du CSL2100 avec dispositif de piégeage d'eau..... 111
Figure 57. Alvéographe Chopin..... 112
Figure 58. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre..... 114
Figure 59. Développement d'une pâte fermentée au mesureur de pousse entre le début (à gauche) et la fin de la fermentation (à droite)..... 116
Figure 60. Diagramme de préparation des échantillons pour le suivi des cinétiques de fermentation et la structure alvéolaire de pâtes lyophilisées..... 117
Figure 61. Test de caractérisation des propriétés mécaniques par le test de compression/relaxation de la mie au TA.XT2i..... 120
Figure 62. La Force en fonction de la distance de compression sur les mies de pain..... 120
Figure 63. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré..... 122
Figure 64. Histogramme des niveaux de gris d'une tranche de pain scannée après conversion de l'image couleur en niveaux de gris..... 123
Figure 65. Exemple d'application d'étapes successives (a) d'érosion et (b) de dilatation de taille 2, 15 et 24 sur la région d'intérêt (le masque)..... 123
Figure 66. Courbe de décroissance de la somme des niveaux de gris selon les étapes de Dilatation et d'Erosions..... 124

Figure 67. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris..... 124
Figure 68. Surface de réponse du comportement élastique (G') des pâtes de la FRF..... 129
Figure 69. Surface de réponse du comportement visqueux (G") des pâtes de la FRF..... 130
Figure 70. Surface de réponse du comportement viscoélastique (tan δ) des pâtes de la FRF..... 130
Figure 71. Surface de réponse des propriétés mécaniques à travers le module de Young apparent (E_{app}) des pâtes de la FRF..... 131
Figure 72. Surface de réponse des propriétés mécaniques à travers l'Indice de Relaxation (IR) des pâtes de la FRF..... 131
Figure 73. Délimitation des domaines optima HPMC-Eau des PSG de la formule RF par superposition des courbes de niveau des paramètres rhéologiques..... 132
Figure 74. Suivi des cinétiques de fermentation par la technique de lyophilisation des pâtes de matières premières exemptes de gluten comparées au témoin de blé tendre..... 134
Figure 75. Suivi des cinétiques de fermentation au mesureur de pousse de matières premières exemptes de gluten comparées au témoin de blé tendre..... 134
Figure 76. Suivi des cinétiques de fermentation par la technique de lyophilisation des pâtes des points de vérification par rapport au témoin de blé tendre..... 135
Figure 77. Microphotographies des matières premières et de la FRF exemptes de gluten et de deux couples HPMC-Hydratation..... 136
Figure 78. Observations en microscopie confocale de la pâte témoin de blé tendre..... 137
Figure 79. Observations en microscopie confocale d'une solution d'amidon de blé tendre..... 137
Figure 80. Représentation schématique des grains d'amidon enchâssés dans la phase protéique..... 137
Figure 81. Microphotographies par MCBL de pâtes à pains sans gluten de la FRF à différents taux d'HPMC..... 138
Figure 82. Evolution du volume spécifique des pains et du volume des bulles leur correspondant sur des couples HPMC-Hydratation dans les domaines optima et en dehors des domaines optima..... 139
Figure 83. Evolution du volume spécifique des pains et du volume des bulles leur correspondant sur des couples HPMC-Hydratation dans les domaines optima. 139
Figure 84. Représentation des Volumes spécifiques du grain de mie des cinq couples HPMC-Hydratation représentatifs à l'intérieur des domaines optima pour la FRF..... 144
Figure 85. Cinétiques d'expansion au cours de la fermentation et de la cuisson des couples HPMC-Hydratation des domaines optima comparés au témoin de blé tendre..... 146
Figure 86. Courbes granulométriques en niveaux de gris de couples HPMC-Hydratation des meilleurs pains..... 148
Figure 87. Carte de ressemblance par ACP sur les courbes de texture granulométriques des images de PSG des couples HPMC-Hydratation issus des domaines optima..... 148
Figure 88. Evolution de la Force de compression maximale au niveau des couples HPMC-Hydratation appartenant aux domaines optima..... 149
Figure 89. Classification par rang de Friedman des PSG issus des domaines optima..... 149

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE
Partie 4

Introduction

Cette partie vise l'étude du comportement rhéologique des pâtes à différents niveaux. La caractérisation de ce comportement a été destinée à la FRF seulement mais mérite en fait d'être étendue aux deux autres. Les résultats de cette caractérisation ont été ensuite exploités et une vérification à travers l'aptitude à la panification est menée. Une partie bibliographique est réservée pour présenter le pain et des aspects utiles sur les pâtes boulangères et leurs critères de qualité ainsi que sur la qualité des produits de panification et en fin sur la panification sans gluten. Sera ensuite exposée l'approche de l'obtention des meilleurs pains sans gluten par la méthodologie des surfaces de réponses. Les résultats dévoileront les caractéristiques rhéologiques des pâtes issues de la formule sans gluten en comparaison à celle de la farine témoin de blé tendre. Les pâtes confectionnées après optimisation des résultats affichées par les surfaces de réponse sont testées en panification

I-PAIN ET PANIFICATION

Le pain est le produit résultant de la cuisson de la pâte faite avec un mélange de farine, de levure, d'eau potable et de sel. L'adjonction de petites quantités d'améliorants est tolérée (ROUSSEL et CHIRON 2002).

Le processus de panification passe essentiellement par trois étapes : *le pétrissage, la fermentation et la cuisson*. Le pétrissage permet le mouillage des ingrédients, le développement de la structure de la pâte l'introduction de l'air sous forme de micro nucléi sphériques (JUNGE et HOSNEY 1981 ; BLOKSMA 1990b). Alors que la fermentation assure l'expansion gazeuse, la pâte passe de l'état liquide à l'état solide caoutchoutique au cours de la cuisson (DAVIES, 1986).

I.1. Pétrissage

Le pétrissage assure le mélange des constituants, la formation d'un réseau viscoélastique et l'incorporation d'air. Ces trois phénomènes synchroniques sont à la base d'une bonne panification. Le mouvement des bras du pétrin permet d'une part l'homogénéisation de la pâte et d'autre part d'y incorporer de l'air sous forme de micro-nucléi sphériques (10 à 100 µm) (JUNGE et HOSNEY 1981). Au cours du pétrissage, l'oxydation des protéines entraîne la création de ponts disulfures par des liaisons covalentes intra et inter moléculaires (EWART 1968 ; 1977 ; 1979). En fin de cette opération, la pâte se détache des parois de la cuve du pétrin, devient lisse, sèche et élastique (FEILLET *et al* 1984).

BLOKSMA 1990b, a bien décrit l'évolution des propriétés rhéologiques de la pâte au cours du processus de panification en passant par les changements de structure aux différentes échelles macroscopique, microscopique et moléculaire. **A l'échelle macroscopique (> 1 mm)**, la pâte apparaît sous forme d'une matrice continue avec une phase gazeuse dispersée (bulles d'air). **Au niveau microscopique (> 0,1 µm)**, la matrice est hétérogène et est constituée d'un réseau continu dans lequel sont enchâssés des grains d'amidon, des cellules de levure, des gouttelettes lipidiques, des débris d'albumen, des parois du grain et des bulles d'air d'une taille inférieure à 1 mm. **Au niveau moléculaire (> 0,1 nm)**, le réseau protéique comporte deux parties. Une phase continue de protéines insolubles avec des lipides absorbés et une phase d'eau continue dans laquelle sont dissous des électrolytes et des sucres.

I.2. Fermentation

I.2.1. Réaction de base

La fermentation est une étape spécifique au processus de panification. Son principal rôle est la production de dioxyde de carbone (CO_2). C'est le résultat de la transformation des sucres en alcool et en acide carbonique. Suite à ceci, une perte de matière entre 2 et 3% est notée (CHARGELEGUE *et al* 1994) :

L'oxygène introduit au cours du pétrissage permet à la levure boulangère d'établir un métabolisme de type respiratoire :

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 \uparrow + 6H_2O + \Delta E\ (688\ kcal) \quad (27°C)$$

En fin de pétrissage, tout l'oxygène introduit est consommé par la levure dont le métabolisme s'oriente alors vers la fermentation alcoolique :

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \uparrow \Delta E\ (56\ kcal) \quad (27°C)$$

L'activité de la levure est influencée par un certain nombre de facteurs tels que la température, le pH, l'aw, les concentrations en sel et en sucres... D'après ROUSSEL et CHIRON 2002, une élévation de la température de la pâte de 1°C entre 20 et 40°C entraîne une augmentation de la vitesse de fermentation de 8 à 12% selon le type de levure.

I.2.2. Résultats de la fermentation

D'après BLOKSMA 1990b et VAN VLIET *et al.* 1992, le gaz carbonique produit au cours de la fermentation se dissout d'abord dans la pâte. Une fois arrivé à saturation, il s'accumule sous forme de gaz dans les nucléi et exerce une pression interne sur le réseau de

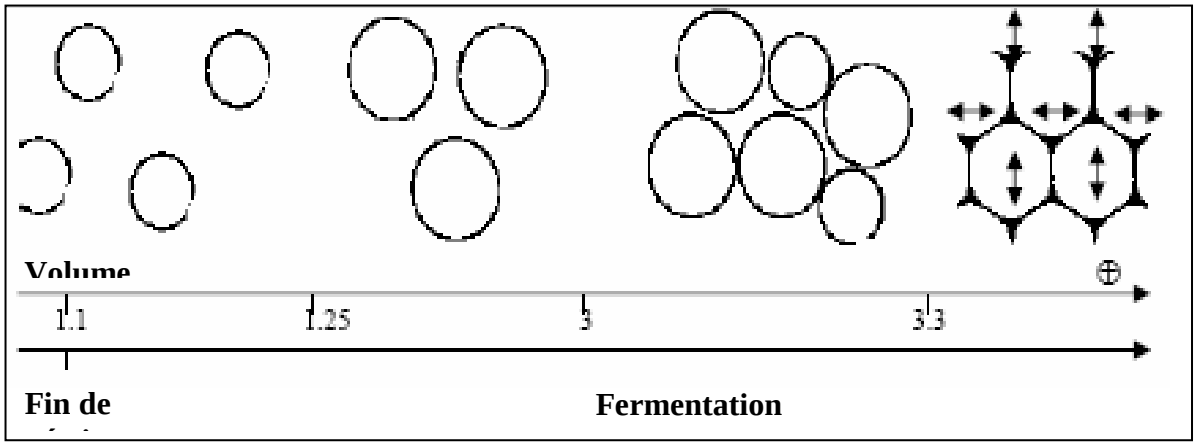


Figure 27. Schématisation de l'évolution de la taille et de la forme (de sphérique à polyédrique) des cellules gazeuses dans une pâte en cours de fermentation (BLOKSMA 1990b ; VAN VLIET *et al.* 1992.

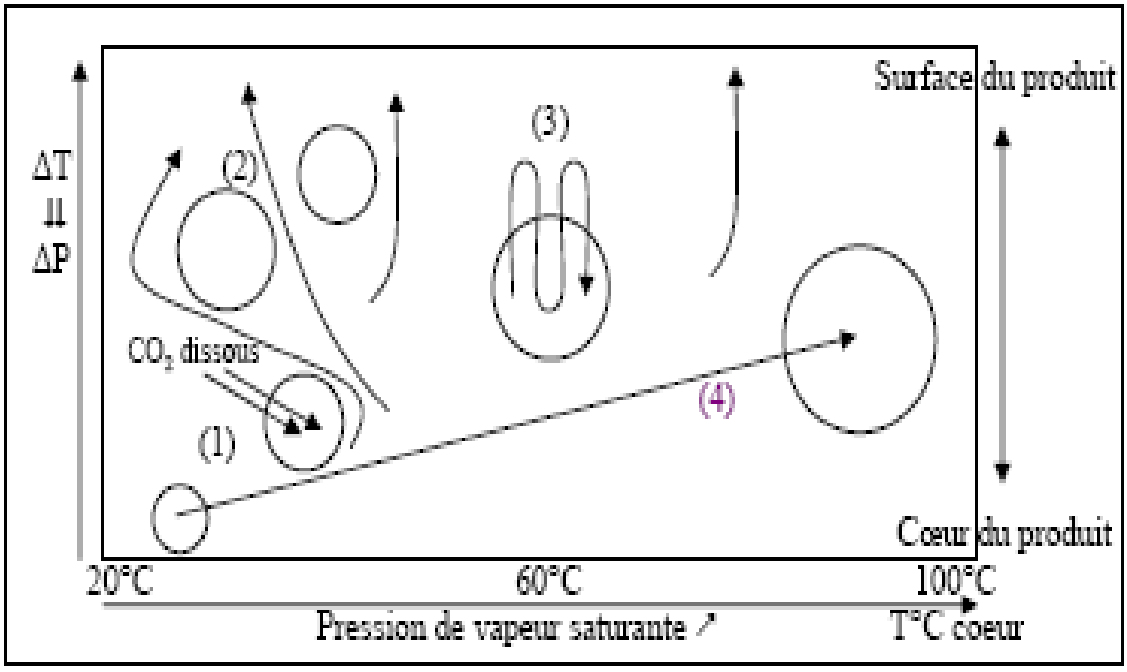


Figure 28. Représentation schématique des mécanismes de (1) diffusion du CO2 ; (2) diffusion de l'eau liquide ; (3) évapo-condensation et (4) expansion des gaz (SABLANI *et al.* 1998).

gluten qui n'est pas perméable aux gaz. Au départ de cette phase d'accumulation, toutes les cellules gazeuses sont sphériques en raison de disponibilité d'espace dans la pâte. Au delà d'un certain seuil d'accumulation gazeuse (volume relatif = 3,3) et sous l'effet de la force de compression engendrée par l'excès de pression à l'intérieur des cellules qui grossissent, la pâte les entourant est étirée **tangentiellement** (parallèlement à la surface des cellules) dans deux directions et **compressée radialement** (perpendiculairement à la surface des cellules). Une déformation pareille est nommée ***extension biaxiale***. Les cellules gazeuses se déforment et passent alors de la forme sphérique à celle polyédrique (Figure 27).

Plusieurs facteurs joueraient un rôle primordial dans la stabilisation de la phase gazeuse au cours de la fermentation. Ces paramètres influenceraient principalement la stabilité du film à l'interface air-matrice continue. Il s'agit essentiellement des constituants majeurs de la farine (protéines, lipides, amidon et pentosanes) ainsi que d'autres additifs en panification tels que les émulsifiants. D'après MAC RITCHIE 1983 ainsi que MARION *et al.* 2003, La présence de surfactants améliorerait cette rétention en augmentant la tension de surface, stabilisant ainsi ce film interfacial.

I.3. Cuisson

Au cours de l'étape de cuisson, une série de transformations physiques, chimiques et biochimiques se produisent simultanément aboutissant au pain. Comme exemples de réactions, SABLANI *et al.* 1998 citent l'expansion du produit, la perte d'eau par évaporation, la formation d'une structure alvéolaire plus ou moins développée, la dénaturation des protéines, la gélatinisation de l'amidon, la réaction de Maillard (brunissement non enzymatique) responsables de la couleur et de l'odeur du produit fini et puis tout ce qui concerne la formation de la croûte.

I.3.1. Expansion au four

Les mécanismes d'expansion gazeuse au cours de la cuisson se résument à quatre principales étapes :

Etape 1 : A l'entrée du four, la levure continue de produire du CO_2 jusqu'aux alentours de 50°C, température de sa désactivation. Les gaz produits se trouvant à l'état dissout dans la pâte (gaz carbonique et éthanol), s'évaporent et enrichissent la phase gazeuse (**(1)**, Figure 28).

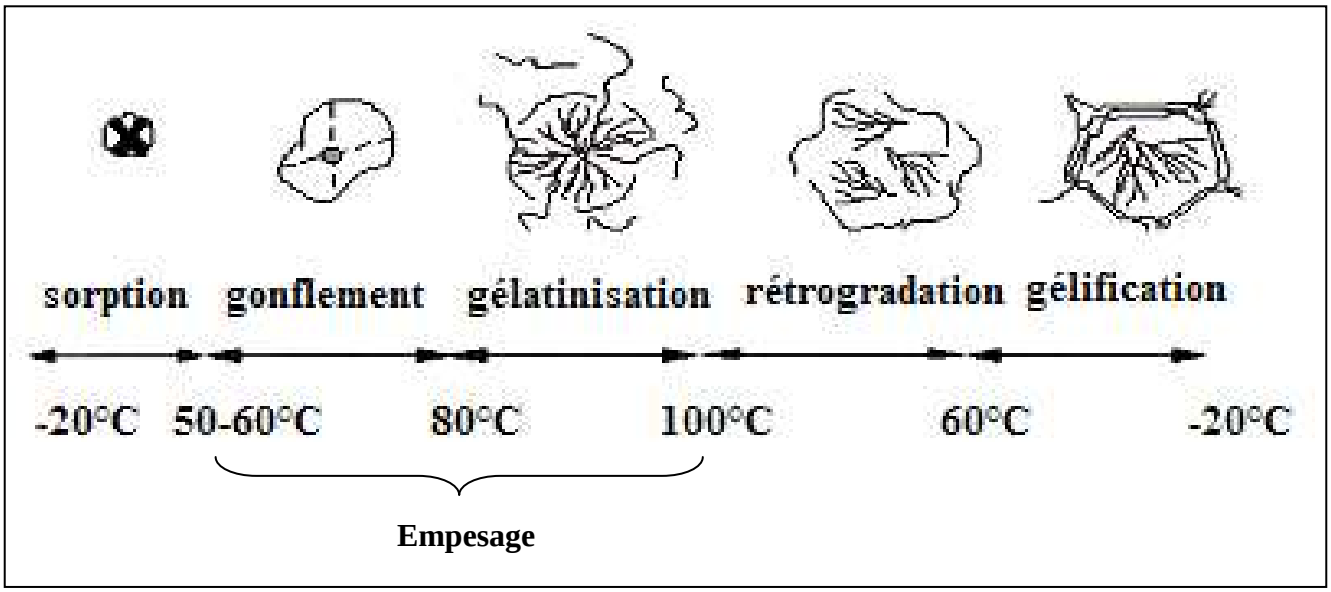


Figure 29. Evolution de la structure d'un grain d'amidon au cours d'un traitement hydro-thermique en excès d'eau (BULEON, COLONNA et LELOUP 1990).

Etape 2 : L'air plus ou moins sec à l'intérieur du four peut impliquer un gradient de concentration en eau qui serait à l'origine de la diffusion d'eau dans la pâte sous forme liquide. Cette diffusion se fait en contournant les bulles gazeuses (**(2)**, Figure 28).

Etape 3 : L'augmentation continue de la température de la pâte entraîne un accroissement de la vapeur saturante dans la pâte même. D'autre part, la différence de température entre la surface et le cœur du produit serait à l'origine d'une pression partielle de vapeur d'eau plus importante en surface (LOSTIE *et al.* 2002). La vapeur d'eau diffuse alors au travers du CO_2 contenu dans la bulle, rencontre un film de pâte à une température plus faible, se condense et diffuse sous forme liquide au travers du même film. Ce film séparant deux bulles proches, l'eau peut s'évaporer à nouveau dans la bulle à plus faible température, c'est le phénomène *d'évapo-condensation* (**(3)**, Figure 28).

Etape 4 : Simultanément, sous l'effet de l'augmentation de la température et conformément à la loi de Gay –Lussac, les gaz inclus dans les cellules s'expansent **((4),** Figure 28). Les avis sur la température d'arrêt de l'expansion sont disparates. Alors que BLOKSMA 1990a la situerait vers 70°C, MOORE et HOSNEY 1985 la place plus haut vers 80°C mais en négligeant la participation de la vapeur d'eau.

D'après HAYMAN *et al.* 1998a, suite au grossissement des cellules gazeuses au four, deux cas de structure alvéolaire de mie en résultent : *fermée (alvéoles indépendantes)* ou *ouverte (coalescence).*

I.3.2. Transition pâte/mie

Les transformations hydrothermiques subies par l'amidon et le gluten sont à l'origine de l'évolution des propriétés rhéologiques des pâtes en cours de cuisson.

- ***transformation hydrothermique de l'amidon :*** A température ambiante, les grains d'amidon natifs sont insolubles dans l'eau. En excès d'eau (> 60% de la masse totale) et à une température supérieure à 60°C, commence le processus de gélatinisation conduisant à la solubilisation partielle de l'amidon (Figure 29). Ce processus comprend un gonflement irréversible suivi d'une perte de la structure granulaire. L'empois obtenu est formé de fantômes de grains et de macromolécules en solutions et ses propriétés dépendent du degré de gélatinisation ainsi que du rapport amylose/amylopectine. Suite à ces transformations, une modification de la consistance du milieu provoquant une augmentation rapide de la viscosité de la phase continue pour atteindre un pic est notée (MORRIS 1990). Au cours du

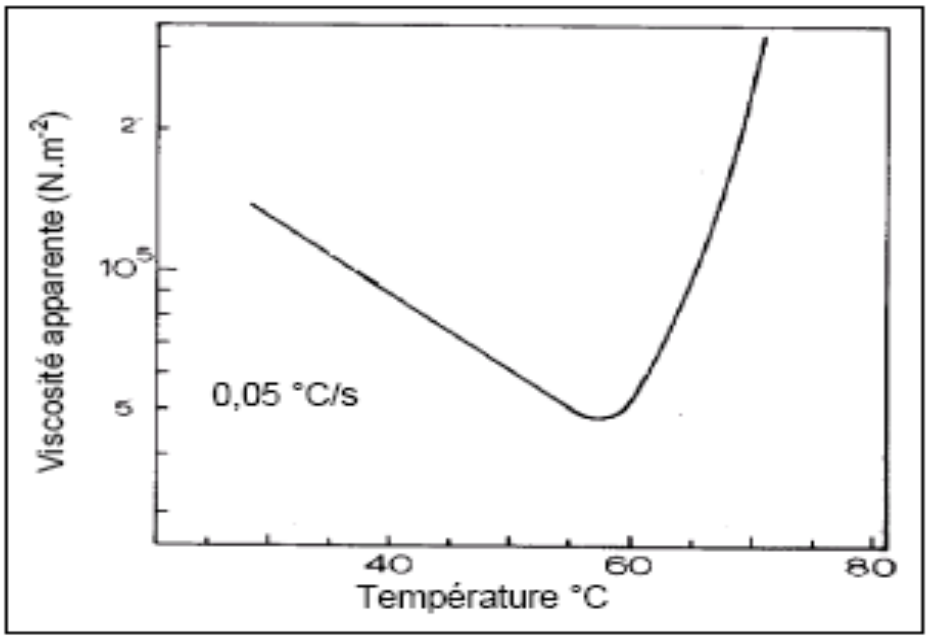


Figure 30. Evolution de la viscosité apparente de la pâte en fonction de la température de cuisson (BLOKSMA 1980)

refroidissement, les gels d'amidons de fèverole plus que ces des autres légumes secs, se caractérisent par une importante rétrogradation par rapport à ceux du blé en raison de leurs fortes teneurs en amylose. Seuls les amidons de légumineuses donnent cette aptitude à la texturation (DELLA VALLE *et al.* 1996)

- ***Transformation hydrothermique des protéines :*** Alors que les protéines de structure (albumines et globulines) subissent une thermocoagulation qui est une transformation réversible des molécules suivie d'une association irréversible de celles-ci par des interactions de type hydrophobe ou à travers l'oxydation de groupements thiols (MULVIHILL and DONOVAN 1987), les protéines de réserve (gluten) se polymérisent de façon directe et irréversible (ponts disulfures). Le passage de la pâte d'un état liquide visqueux à un état solide élastique correspond à la transition vitreuse (TOUFEILI *et al.* 2002). On aboutit à la formation d'un réseau de protéines thermoformées par la création de ponts disulfures. On parle alors de la réticulation des protéines ou encore d'agrégation. Alors que les films de gliadines présentent une baisse d'extensibilité et une augmentation de rigidité (SCHOFIELD *et al.* 1984), les gluténines de haut poids moléculaire donnent lieu à un réseau plus élastique et plus rigide (SHEWRY *et al.* 1986). Le résultat final est une baisse de l'extensibilité contre un gain en fermeté et en élasticité du réseau formé.

L'action de l'amidon et des protéines se situe dans la même plage de température rendant la séparation de leurs effets difficiles. L'exemple de l'évolution de la viscosité de la pâte à pain en cours de cuisson le confirme (Figure 30). D'après BLOKSMA 1980, dès le début de cuisson et jusqu'à une température d'environ 60°C, la viscosité apparente diminue pour atteindre un minimum ($\eta_{60°C} \cong 1/5\ \eta_{26°C}$). Dans cette zone de température, le gonflement progressif des grains d'amidon (Figure 30) et le début de coagulation du réseau tridimensionnel de gluten sont probablement à l'origine de l'augmentation rapide de la valeur de la viscosité apparente.

II-PATES BOULANGERES ET CRITERES DE QUALITE

La caractérisation des propriétés rhéologiques des pâtes céréalières se fait classiquement par des méthodes empiriques permettant de mimer des paramètres discriminants et prédictifs de la panification. On utilisait par exemple pour la mise en évidence des phénomènes se produisant au cours de la mise en forme et la levée de la pâte l'Extensographe Brabender et l'Alvéographe Chopin (LAUNAY et BARTOLUCCI 1997). Plus récemment, les méthodes dites fondamentales car permettant un calcul simple des

déformations et des contraintes au sein du produit, apportent plus de précisions sur le comportement rhéologique des pâtes céréalières. D'après BERLAND et LAUNAY 1995, les essais aux petites déformations en régime dynamique qui assure des conditions non destructives des pâtes permettent d'approcher leurs propriétés viscoélastiques. Aux grandes déformations, et dans des conditions où les propriétés ne sont pas modifiées par la mesure en elle même, l'extension biaxiale qui correspond au type de déformation qui prédomine au cours de la fermentation et de cuisson, est également intéressante à étudier (LAUNAY et MICHON, 2008).

II.1. Importance des propriétés techno fonctionnelles des constituants impliqués

Les constituants de la farine interviennent à travers leurs propriétés techno fonctionnelles dans la formation de la pâte en lui conférant différentes propriétés rhéologiques tout au long du processus de fabrication.

- ***L'eau d'hydratation*** : assure la dissolution des principaux composés, l'homogénéité, la cohésion de la pâte et la plus part des réactions physico-chimiques (ELIASSON et LARSSON 1993). La solubilisation du sel par l'eau permet la formation de liaisons de type ionique avec les protéines de la farine essentielles pour le développement de la pâte (ROUSSEL et CHIRON 2002). Elle joue de rôle de plastifiant en favorisant la mobilité des protéines en diminuant la viscosité de la pâte (LEVINE et SLADE 1990). La rétention gazeuse serait proportionnelle avec la quantité en eau de la pâte jusqu'à 44%, teneur en eau classique d'une pâte à pain (GAN *et al* 1995).
- ***Les protéines : l***es principaux facteurs déterminant la qualité boulangère d'une farine de blé tendre est la qualité et la quantité de ses protéines (GOESAERT *et al.* 2005). Alors que les gluténines de haut poids moléculaires procurent la force (résistance à la déformation) et élasticité à la pâte (EWART 1972 ; BELTON 1999 ; VERAVERBEKE and DELCOUR 2002), les gliadines seraient plutôt responsables de son extensibilité (ELIASSON et LARSSON 1993). Pour assurer une bonne qualité en panification, un rapport adéquat entre viscosité de la pâte et élasticité/force est nécessaire (CORNEC, POPINEAU and LEFEBVRE 1994 ; KHATKAR, BELL and SCHOFIELD 1995). Les protéines des légumes secs sont connues pour leurs propriétés filmogènes, émulsifiantes, moussantes et thermoplastiques intéressantes (CASEY *et al.* 1993 ; GUEGUEN and CERLETTI 1994 ; SHEWRY 1995 ; CREVIEU *et al.* 1996 ; CREVIEU *et al.* 1997 ; FERRASSON *et al.* 1997 ; BOULTER and GROY 1997 ; NIEDDU *et al.* 1999 ; VIROBEN *et al.* 2000). L'hydratation des protéines

au cours du pétrissage facilite ainsi au cours de la fermentation leur déplissage à l'interface air-matrice continue entraînant la stabilisation de l'interface (GAN *et al.* 1995).

- ***Les lipides*** : les acides gras polyinsaturés sont oxydés par les lipoxygénases du blé engendrant la formation d'hydroxyperoxydes et de radicaux libres. Ces composés sont capables d'oxyder d'autres constituants tel que les protéines et les caroténoïdes, affectant ainsi les propriétés rhéologiques des pâtes et la couleur de la mie des pains (HOSENEY 1994). Au cours de la fermentation, les lipides originels de la farine ont en fonction de leur nature des rôles paradoxaux dans la rétention gazeuse. Alors que les lipides polaires améliorent les performances de rétention gazeuses des pâtes, les lipides apolaires, et plus précisément les acides gras libres et les triglycérides, sont des agents anti-mousse et semblent diminuer ces capacités de rétentions (MAC RITCHIE et GRAS 1973).
- ***L'amidon :*** Au cours de la préparation de la pâte, l'amidon absorbe plus de 46% d'eau. Des études ont reportées que le comportement rhéologique des pâtes de blé est influencé par les propriétés spécifiques des surfaces des grains d'amidon (LARSSON and ELIASSON 1997) et par la présence d'enzymes amylolytiques (MARTÍNEZ-ANAYA and JIMÉNEZ 1997).
- ***Les fibres :*** D'après FEILLET 2000, il est admis que les pentosanes solubles et insolubles ont des actions antagonistes sur les volumes finaux des pains. Alors que les premiers jouent un rôle de régulateurs d'hydratation favorisant le bon développement du réseau de gluten, les seconds favorisent une prise d'eau initiale hétérogène et trop importante freinant ainsi son développement optimal (KULP and BECHTEL 1963 ; KULP 1968 ; JELAKA and HLYNKA 1971 ; JELAKA and HLYNKA 1972 ; MICHNIEWICZ *et al* 1991 ; COURTIN, ROELANTS and DELCOUR 1999 ; FEILLET 2000 ; ROUAU 1993). Les pentosanes solubles contribueraient à la constitution d'un environnement aqueux saturé en CO_2 autour des alvéoles en cours de fermentation par la formation d'un gel. Ils limiteraient la diffusion du gaz carbonique vers l'atmosphère environnant la pâte et participerait ainsi à un meilleur développement de cette dernière et donc, au volume du pain (FEILLET 2000).

II.2. Caractères rhéhologiques des pâtes

II.2.1. Propriétés texturales par compression biaxiale en conditions lubrifiées : Squeezing flow

D'après BLOKSMA and BUSHUK 1988, les pâtes céréalières subissent au cours du processus de fabrication des déformations qui dépassent largement l'ordre de grandeur des tests en régime dynamique (≤ 0,2%), pouvant aller parfois jusqu'à la déstructuration du

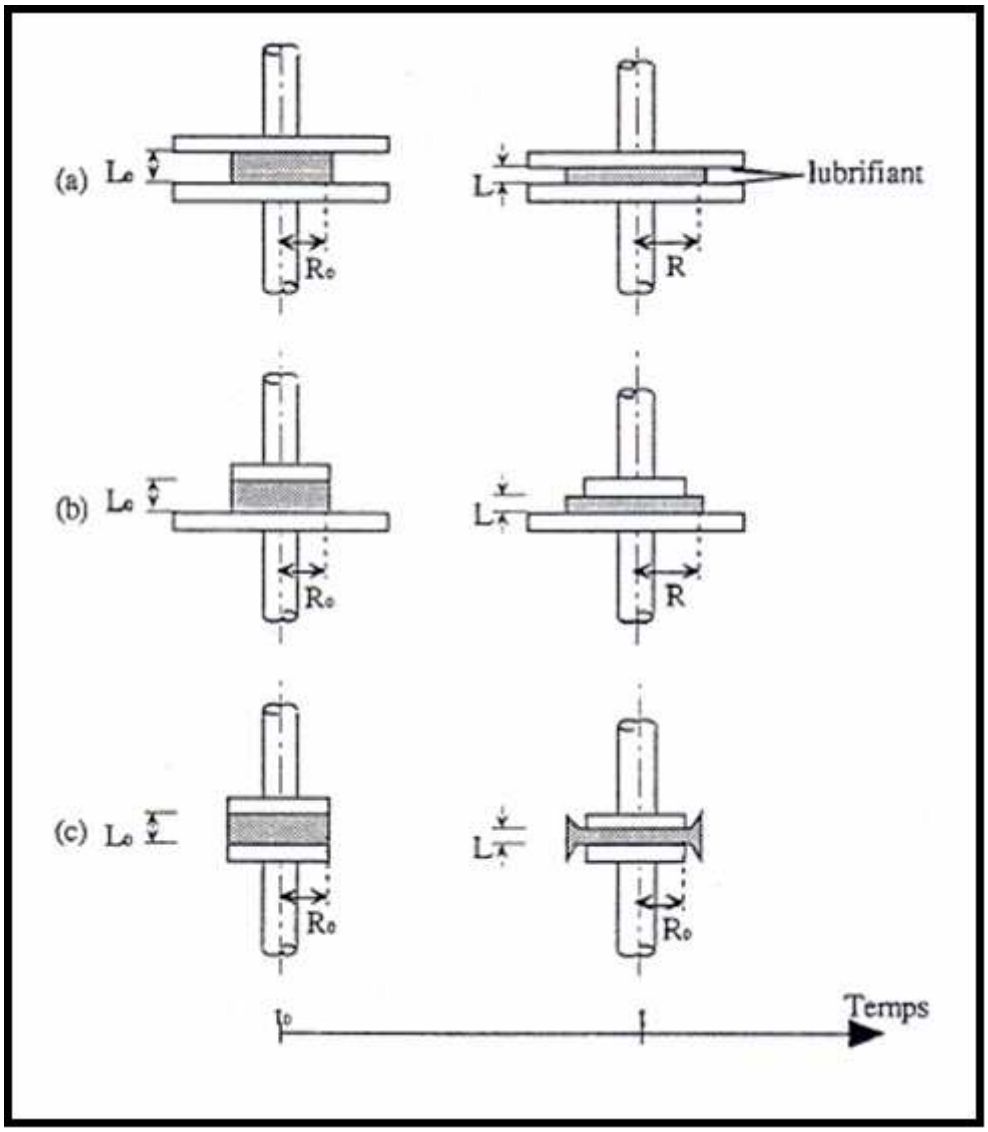


Figure 31. Extension biaxiale par compression en conditions lubrifiées : compression à volume constant (a) diamètres de la base et du corps de mesure supérieurs à celui de l'échantillon, compression à surface constante : (b) diamètres du corps de mesure et de l'échantillon identiques, diamètre de la base supérieur et (c) diamètres des plateaux et de l'échantillon identiques (LASSOUED 2005).

Légende :

L_0 : hauteur initiale du disque de pâte ;
L : hauteur du disque de pâte à l'instant *t ;*
R_0 : rayon initial du disque de pâte ;
R : rayon du disque de pâte à l'instant *t*.

Matériau (avec notamment la rupture des parois).

Selon VAN VLIET *et al.* 1992, le type de déformation qui prédomine lors du grossissement des bulles au cours de la fermentation et de la cuisson est l'extension biaxiale. LAUNAY et BARTOLUCCI 1997 soulignent que l'approche empirique de ce phénomène à été étudiée à l'aide d'appareils qui mettaient en jeux un étirement de la pâte se rapprochant ainsi des phénomènes intervenant lors de sa mise en forme et de la levée : l'Extensographe Brabender ou l'Alvéographe Chopin. MULLER *et al*. 1961 ; BLOKSMA and BUSHUK 1988 ; DOBRASZCZYK et ROBERTS 1994 ont cependant signalé que les vitesses de déformation appliquées au niveau de ces appareils étaient supérieures à celles impliquées lors de la fermentation et de la cuisson de pâtes à pain : 10^{-1} à 1 s^{-1} contre 10^{-4} à 10^{-3} s^{-1} au cours de la fermentation et $\cong 2.10^{-3}$ s^{-1} pour la levée au four.

MAKOSKO 1994, rapporte qu'il préfère pour ce type d'appréciation la technique de compression en conditions lubrifiées car elle permet de mieux approcher les conditions réelles. L'avantage de cette technique réside dans la possibilité de mesure de la déformation et de la contrainte durant tout l'essai.

D'après CHATRAEI *et al.* 1981 et STEFFE 1996, le principe consiste à réaliser une compression soit sous l'action d'une force constante soit d'une vitesse constante de déplacement du plateau supérieur. Selon les diamètres relatifs des plateaux et de l'échantillon, 3 géométries de dispositifs sont possibles : compression à volume constant (Figure 31 a) ou à surface constante (Figures 31 b et c). Pour tous ces dispositifs, la déformation est équibiaxiale et considérée comme uniforme pour l'ensemble des échantillons. MAKOSKO 1994, rappelle que sous certaines conditions, notamment lorsqu'il y a glissement parfait à la surface des plateaux, la compression uniaxiale correspond à un écoulement équibiaxial.

II.2.2. Propriétés viscoélastiques en régime dynamique

D'après BLOKSMA 1990a, les pâtes céréalières se caractérisent en général par un comportement viscoélastique non linéaire. Ceci veut dire que les déformations ou les vitesses de déformations mesurées ne sont pas proportionnelles aux contraintes imposées ou inversement. Le préambule des mesures en régime dynamique réside dans la détermination du domaine de linéarité. Il est classiquement défini comme le domaine où les valeurs des paramètres mesurés sont indépendantes de l'amplitude de la déformation. Les essais en

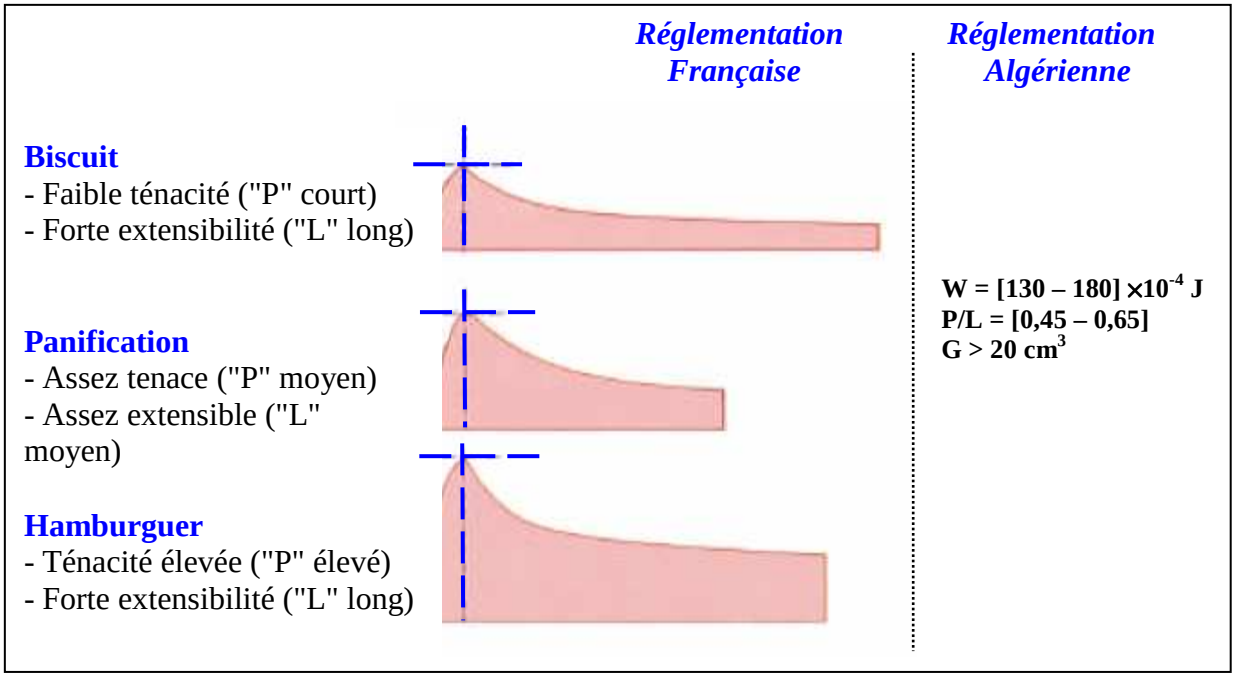


Figure 32. Interprétation des résultats de l'Alvéographe Chopin selon les réglementations Française (GUINET et GODON 1994) et Algérienne (J.O.R.A. 1991)

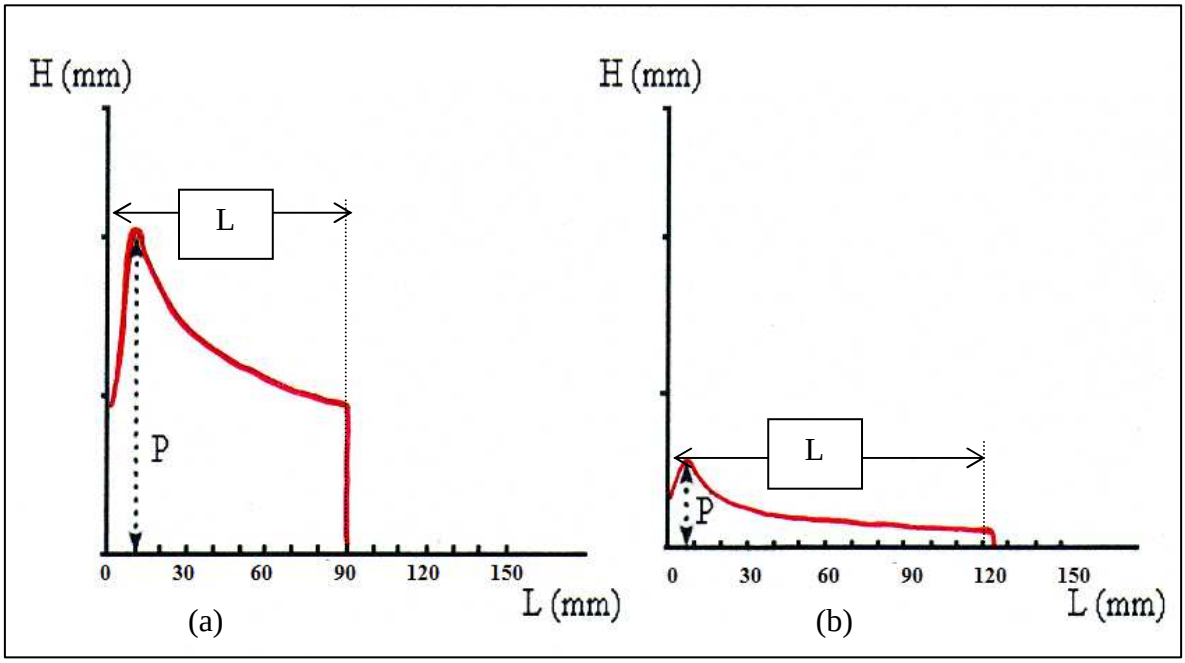


Figure 33. Alvéogrammes de deux pâtes à base de blé dur : (a) : pâte forte, (b) : pâte faible NAEGA 2005

régime dynamique présentent l'avantage d'être, dans les conditions de linéarité, non destructifs, permettant ainsi d'étudier les modifications de structure du matériau, induites par exemple par un changement de température, sans modifier ses propriétés par la mesure elle même. Selon DUS et KOKINI 1990, le domaine de linéarité des pâtes à base de farine de blé tendre est défini en général dans le domaine des déformations < 0,2%. Le module G' représente la composante *"élastique"* du système. Elle correspond à l'énergie conservée par le système après déformation. Le module G" représente la composante *"visqueuse"* et correspond à l'énergie dissipée.

He and HOSNEY 1992, ont également montré à travers des études rhéologiques en régime dynamique sur des pâtes à base d'eau et de gluten, que celles de gluten faible se caractérisent par un bas module conservatif (G') et des valeurs de tan δ plus élevées que celles de pâtes fabriquées avec du gluten fort. Cependant et contrairement à ce qui a été observé

pour ces pâtes, ils soulignent que celles fabriquées à partir de farine de faible qualité et des autres ingrédients de panification excepté la levure ont les modules conservatifs (G') les plus élevés. D'après BERLAND 1993, les faibles valeurs de G' sont un indicateur de la faible structuration de la pâte reflétant le peu de ponts et de liens formés. D'autre part, He and HOSNEY 1992, suggèrent l'existence de probables interactions significatives entre les protéines et les autres composants des pâtes.

II.2.3. Valeur boulangère par 1'Alvéographe Chopin

L'approche de la valeur boulangère d'une pâte et la prédiction de ses propriétés panifiables peut se faire empiriquement à travers la mesure de leurs force et expansion par l'Alvéographe Chopin (DEL FRATE 2005). Les principaux paramètres retenus sur les alvéogrammes (P/L et W), permettent d'orienter les farines en biscuiterie, en boulangerie ou pour d'autres préparations. Les réglementations algérienne en matière de boulangerie (J.O.R.A. 1991) et française (GUINET et GODON 1994) ont fixé des valeurs pour ces paramètres que nous résumons dans la Figure 32.

L'Alvéographe Chopin permet donc la détermination de la force du gluten d'une pâte par la mesure de la force nécessaire à gonfler et à assurer la rupture de la bulle de pâte. Selon la forme de la courbe, il est possible de préjuger de la ténacité et de l'extensibilité d'une farine. Plus le rapport P/L est élevé (courbe plus haute que longue (Figure 33a)), plus la farine

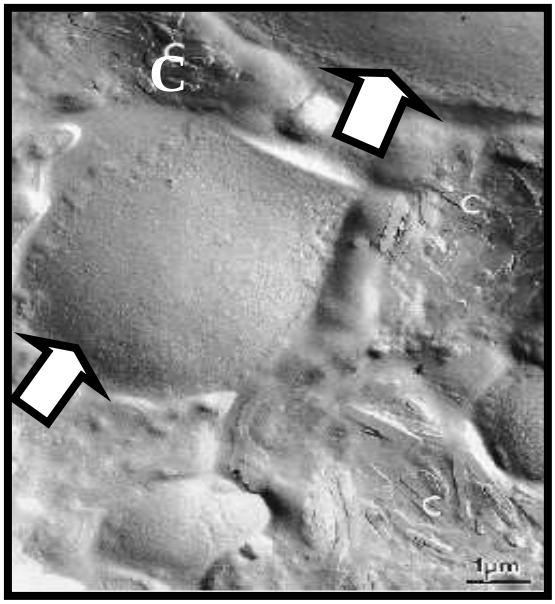


Figure 34. Imagerie d'une pâte fermentée obtenue par microscopie électronique à transmission. C : Cristaux de matière grasse se plaçant autour des cellules gazeuses et les stabilisant, ⇨ : Cellules gazeuses (BROOKER 1996).

sera tenace et forte. Par contre, si ce rapport est plus faible (courbe plus longue que haute (Figure 33b)), la farine sera extensible. Le W quant à lui, peut être identique dans ces deux cas, ce qui nous laisse dire que ce paramètre à lui seul ne permet pas de préjuger du comportement futur d'une farine (NAEGA 2005).

II.3. Microstructure de la pâte

En sortie de pétrissage, deux techniques microscopiques sont en général employées en vue de caractériser la microstructure de la pâte : la microscopie optique et la microscopie électronique. Le choix de la technique varie en fonction de la nature de l'échantillon, de l'objectif de l'observation et de la résolution recherchée. D'après AGUILERA et STANLEY 1999, alors que la microscopie optique est utilisée beaucoup plus pour l'étude de la structure de la surface et des sections, sa duale électronique, en plus de la structure des surfaces, elle permet la visualisation également des sections fines. La première technique permet une résolution entre 200 et 500 nm contre 0,2 à 6 nm pour la deuxième. Le grossissement est plus important en microscopie électronique (20 à 500 000×) qu'en microscopie optique (10 à 1500×). En microscopie optique la préparation des échantillons qui sont épais, est en général facile. Pour la microscopie électronique, les échantillons sont fins à moyennement épais et leur préparation varie de facile à difficile.

II.3.1. Observations par microscopie électronique

La microscopie électronique a été utilisée pour l'identification de produits d'intérêt (cellules gazeuses, matière grasse liquide ou solides, ...) dans la pâte au cours des différentes étapes du processus de fabrication. BROOKER par exemple en 1996, dans son étude sur l'effet de la matière grasse (solide ou liquide) sur les propriétés de la pâte au cours du pétrissage, a pu mettre en évidence des cristaux de matière gras autour des bulles gazeuses par microscopie électronique à transmission (Figure 34). Par ailleurs, ne pouvant pas voir les traces de l'huile sur la pâte et plus particulièrement sur les parois des bulles gazeuses, il a exclu son effet sur les propriétés de la pâte. Pareillement, RIBOTTA *et al.* 2004 n'ont pas pu avoir d'informations quant au mécanisme d'action de l'émulsifiant et sa localisation lors de l'étude qu'ils ont mené sur l'effet de l'émulsifiant DATEM sur la microstructure d'une pâte céréalière. Ils n'ont pu mettre en évidence qu'une augmentation de la fraction du vide entre les grains d'amidon et le réseau de gluten et ont suggéré un effet du DATEM sur la quantité d'ai incorporé au cours du pétrissage. Ainsi, on peut conclure que cette technique de visualisation des pâtes ne permet pas de mettre en évidence les mécanismes d'action des

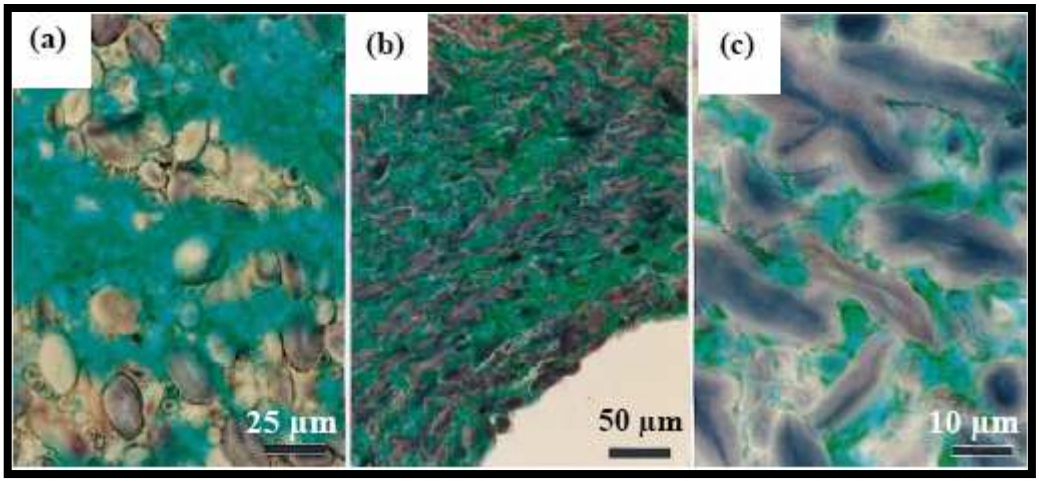


Figure 35. Observations par microscopie en lumière directe de la microstructure d'une cryo-section d'une pâte fermentée (a) et d'un échantillon de mie à deux grossissements (b et c) (HUG-ITEN *et al* 1999)

facteurs influençant les propriétés des pâtes.

II.3.2. Observations par microscopie optique

Malgré la faible résolution de cette technique (200 à 500 nm) par rapport à la microscopie électronique (0,2 à 6 nm), elle permet l'investigation d'une grande variété de produits complexes en raison de l'utilisation de colorants qui se fixent préférentiellement sur certains composés de l'échantillon (AUTIO et SALMENKALLIO-MARTITILA 2001).

II.3.2.1. Vues en lumière directe et microscopie en contraste de phase

Ces techniques ont surtout été employées pour l'identification et la localisation des protéines et de l'amidon au niveau des pâtes et dans les mies. Ainsi, HUG-ITEN *et al.* 1999, ont pu voir les changements s'opérant sur les protéines et les grains d'amidon avant et après cuisson (Figure 35). Les grains d'amidon sont colorés en violet suite à l'ajout *d'iode* dans la pâte et les protéines en vert avec le *light green*. En fin de fermentation (Figure 35a), les auteurs soulignent une distribution hétérogène des grains d'amidon et des protéines dans la pâte avec accumulation de plusieurs grains d'amidon dans certains endroits.

D'après LASSOUED (2005), ce type d'observation microscopique est fonction du pétrissage, de la fermentation, du façonnage et de la teneur en protéines des échantillons de pâte. Après cuisson (Figure 35b), HUG-ITEN *et al.* 1999 soulignent l'état gonflé des grains d'amidon, leur forme ovoïde et leur orientation montrant leur alignement parallèle à la surface des alvéoles. La forme ovale et l'orientation des grains seraient probablement le résultat de l'étirement de la pâte lors du grossissement des cellules gazeuses dans la première phase de cuisson. Un grossissement de l'image du produit cuit (Figure 35c) permet de confirmer l'orientation de ces grains et de mettre en évidence la fusion de certains d'entre eux. Les auteurs avancent que c'est l'accumulation de l'amylopectine qui serait à l'origine des zones ovales en violet foncé observées à l'intérieur des grains d'amidon de grande taille contre une zone bleu riche en amylose les entourant. Cette séparation de phases expliquée par l'incompatibilité thermodynamique de l'amylose et de l'amylopectine (KALICHEVSKY et RING 1987), n'est pas observée dans le cas des grains d'amidon de petite taille. A cette échelle microscopique, les parois des alvéoles de la mie peuvent être décrites comme une structure bi-continue composée respectivement d'amidon et de protéines (HUG-ITEN *et al* 1999). L'observation du phénomène de sortie des chaînes d'amylose des grains d'amidon en

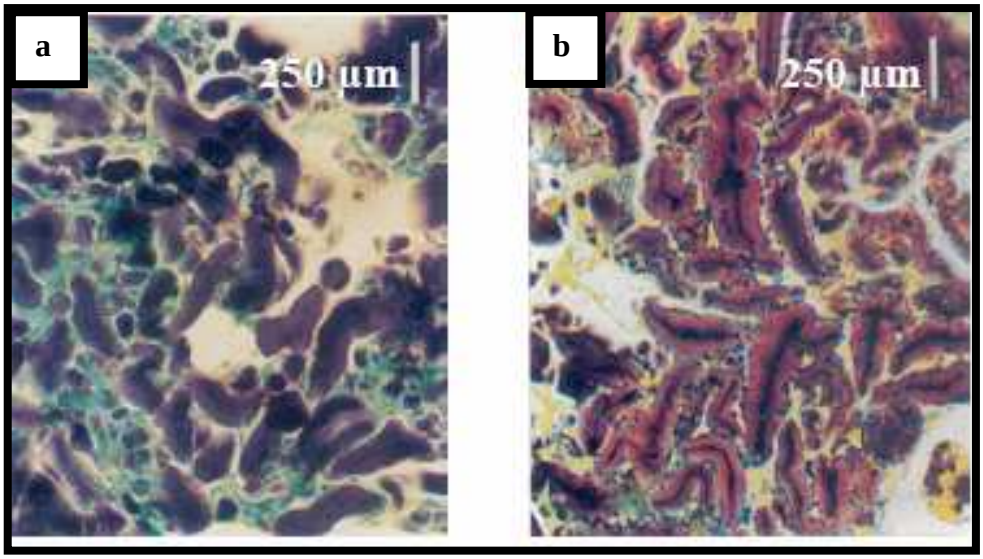


Figure 36. Observations par microscopie en lumière directe de mies de pains fabriqués avec de la farine de blé (a) et de seigle (b) (AUTIO *et al.* 1997)

Figure 37. Image tridimensionnelle d'un réseau protéique entourant les bulles gazeuses dans une pâte céréalière à base de blé obtenue par microscopie à balayage laser (LI *et al.* 2004)

fin de cuisson des produits de panification, avec ce type de microscopie reste toutefois sujette à confirmation. AUTIO *et al.* 1997, mettent en évidence des différences importantes quand à l'étendue de ce phénomène lors de l'observation microscopique des mies de produits à base de farine de blé tendre ou de seigle (Figure 36). D'après ces auteurs, les fortes teneurs en eau et la présence d'α-amylases expliqueraient en partie le gonflement important des grains d'amidon observés pour les pains à base de farine de seigle (Figure 36b). Egalement, sont notées pour ce type de pain la sortie des chaînes d'amylose des grains d'amidon et la séparation des chaînes d'amylose et d'amylopectine colorés respectivement en bleu et en marron. Contrairement à ceci, l'amylose resterait localisée au sein des grains d'amidon qui sont peu gonflés pour les pains fabriqués à base de farine de blé (Figure 36a).

II.3.2.2. Vues par Microscopie Confocale à Balayage Laser (MCBL)

La Microscopie Confocale à Balayage Laser (MCBL) est un précieux outil de compréhension de la microstructure des produits céréaliers (RENZETTI *et al.* 2008). C'est une association de la microscopie par fluorescence, basée sur le marquage de composés spécifiques de l'échantillon étudié par des fluorophores et d'un balayage par un faisceau laser de l'échantillon selon plusieurs plans permettant l'obtention d'images en 3D. L'avantage de cette technique réside dans sa capacité à produire des sections optiques à travers un échantillon tridimensionnel même épais (à une profondeur de 2,1 mm dans le cas de pâtes céréalières), en vue de sélectionner et de différencier des structures particulières dans un système alimentaire sans l'endommager (DÜRRENBERGER *et al.* 2001 ; LI *et al.* 2004 ; RENZETTI *et al.* 2008). Un exemple de structure tridimensionnelle d'une pâte à pain a été ainsi mis en évidence en 2004 par LI *et al.* (Figure 37), montrant le réseau de gluten séparant et entourant les cellules gazeuses.

Le marquage peut se faire selon deux modes :

- ***Mode covalent*** : Le composé visé par le marquage est lié par des liaisons covalentes au marqueur avant la fabrication du produit à observer. Li *et al.* 2004, ont utilisé ce type de marquage pour connaître la répartition des gliadines, des gluténines, des lipides polaires et apolaires dans la pâte. Les gliadines et gluténines ont été marquées séparément avec la rhodamine B, alors que les lipides ont été achetés à l'état marqué. Les gliadines, observées avec les gluténines sur l'ensemble de la matrice séparant les bulles gazeuses, semblent

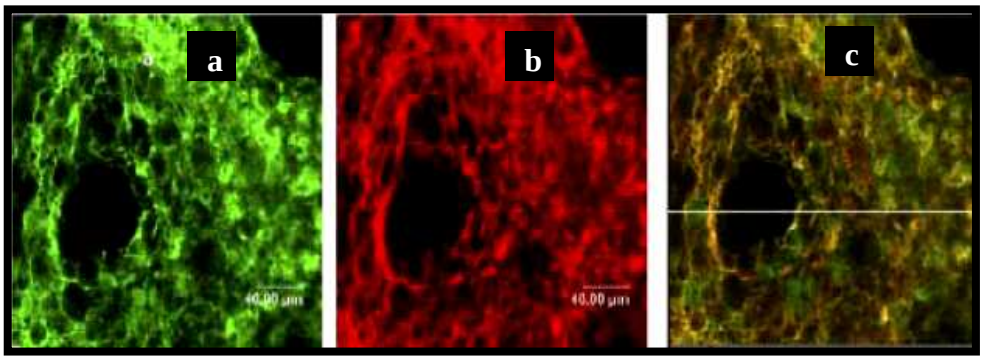


Figure 38. Microscopie Confocale à Blayage Laser (MCBL) : (a) : marquage des lipides polaires, (b) : marquage des gliadines, (c) : Superposition des deux images (LI *et al.* 2004).

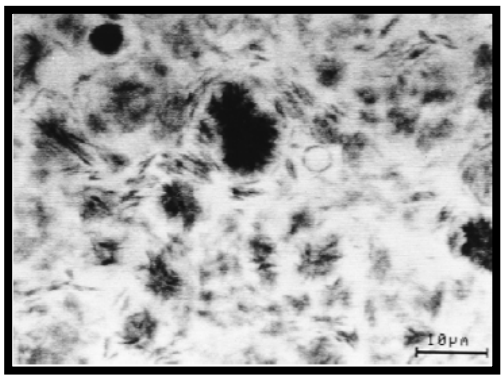


Figure 39. Observation par MBCL d'une pâte avec un émulsifiant du commerce (dispersion de cristaux) (BROOKER 1999).

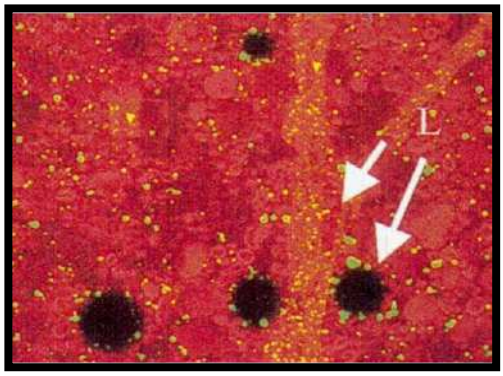


Figure 40. Localisation des lipides polaires (L) aux alentours des bulles gazeuses dans une matrice protéique par MBCL (DUBREIL *et al.* 2002)

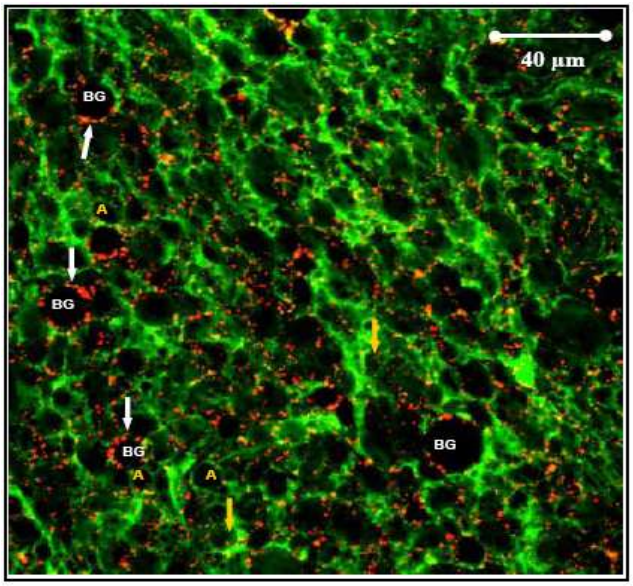


Figure 41 Observations en microscopie confocale (×40) d'une pâte à 2% de saccharose, 10% d'huile de colza et 55% d'eau (teneurs exprimées en masse fraîche (MF)). A : amidon, BG : bulles gazeuses (LASSOUED 2005).

s'associer aux lipides polaires pour se placer à la surface des bulles gazeuses (Figure 38). Ces observations confirment que les gluténines influenceraient plus l'élasticité du réseau alors que les gliadines interviendraient autant que les lipides polaires dans la stabilisation de la phase gazeuse. Ces même auteurs montrent que les lipides apolaires se localisent principalement à la surface des grains d'amidon, ou forment de petites gouttelettes dans la pâte, ce qui suggère leur probable intervention dans les interactions amidon/matrice protéique/lipides et donc affectent les propriétés rhéologiques de la pâte (LI *et al.* 2004).

- ***Mode non covalent*** : Ce type de marquage consiste à ajouter le marqueur à l'état dissous dans le produit. Le *Nil red* connu pour son marquage uniquement des phases liquides des matières grasses et non des cristaux, a été utilisé par BROOKER en 1996 dans son étude sur l'ajout de différents émulsifiants dans la pâte. Lors de cette étude, la répartition des cristaux de matière grasse dans la pâte a été observée par inversion de contraste. Pour un émulsifiant avec 6 à 7% de matière grasse solide, l'auteur souligne l'observation de cristaux de 8 µm de longueur et 1µm de largeur regroupés de façon hétérogène de 10 à 20 dispersés dans la phase huileuse de la pâte (Figure 39). D'autre part, DUBREIL *et al.* 2002, ont pu confirmer la dispersion dans la pâte des bulles gazeuses sous forme de cercles d'environ 20 µm de diamètre par marquage des lipides de la farine par du *bodipy* (Figure 40).

LASSOUED 2005, a également utilisé le marquage non covalent des lipides par du *Bodipy* (mode non covalent) et des protéines par marquage covalent avec de la *Rhodamine B* pour étudier l'effet de l'ajout d'eau, de saccharose et d'huile de colza sur la microstructure de pâtes à base de blé tendre. Dans la figure 41, sont reportées ses observations concernant l'effet du saccharose sur la microstructure de la pâte. L'huile est globalement, répartie dans l'ensemble de la pâte sous forme de gouttelettes (<2µm). Certaines d'entre elles sont disposées en couronne autour de cercles noirs. Le gluten est structuré en un réseau continu constitué d'agrégats de protéines sous forme de fibres, dans lesquelles viennent s'enchâsser des formes noires plus ou moins sphériques (5 et 30 µm). Ces formes peuvent correspondre aux grains d'amidons non marqués ou aux bulles gazeuses introduites dans la pâte lors du pétrissage. Il est difficile de distinguer les grains d'amidon des bulles de gaz. Néanmoins, LASSOUED 2005 suggère, en se basant sur l'ensemble des observations qu'elle a pu obtenir par MCBL au cours de la fermentation, que seules bulles de gaz sont entourées d'une couronne de gouttelettes lipidiques (rouge). Les grains d'amidons ont une forme moins circulaire que les bulles de gaz et peuvent être

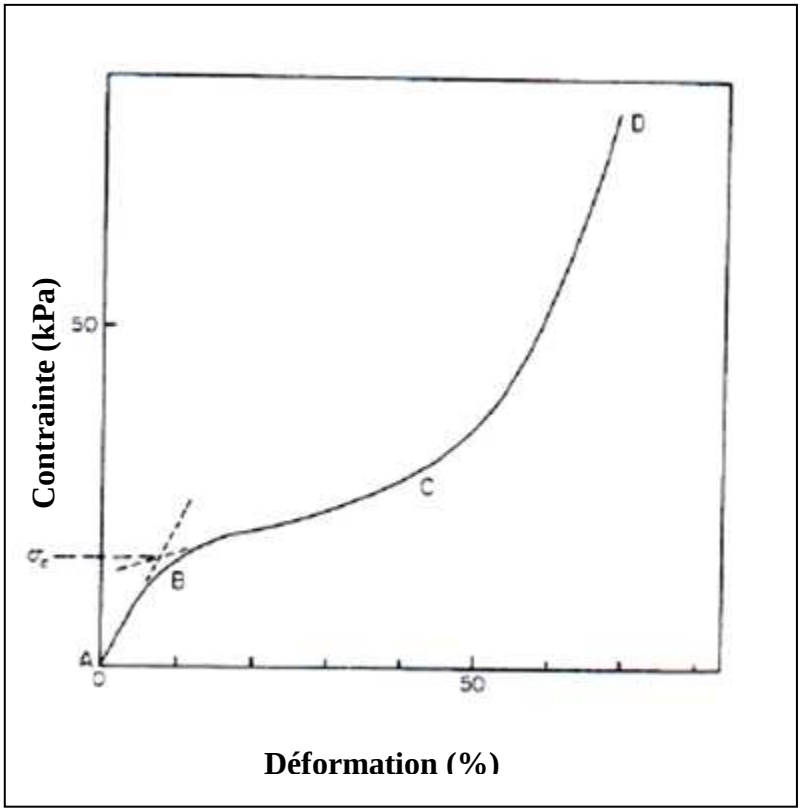


Figure 42. Courbe typique de l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation lors de la compression d'une mie de cake (ATTENBURROW *et al.* 1989).

recouverts d'un voile vert diffus correspondant à leur recouvrement par le réseau de gluten en couche mince.

III. QUALITE DES PRODUITS DE PANIFICATION

III.1. Propriétés mécaniques du pain

L'essai de compression constitue le test le plus répandu de la caractérisation des propriétés mécaniques de la mie. A titre d'exemple, ce test peut être utilisé pour évaluer l'effet des matières premières sur l'élasticité des produits finis ou pour suivre le rassissement d'un produit au cours du temps de stockage (KEETELS *et al.* 1996). D'après SCANLON et ZGHAL 2001, cette évaluation se fait sur la base des fractions volumiques constituant le pain : parois et alvéoles. La nature de leurs interconnections (continues ou non) en déterminent la structure ainsi que les propriétés mécaniques.

Une courbe typique issue d'un test de compression d'un échantillon de mie d'un produit de cuisson entre deux plans parallèles, (contrainte = *f* (déformation)) est représentée sur la Figure 42. Elle comporte trois domaines (ATTENBURROW *et al.* 1989) :

- ***La phase de déformation élastique*** **A-B** : où la contrainte augmente rapidement et à peu près linéairement avec la déformation. Le module d'Young apparent (E_{app}) est le principal indicateur de l'élasticité du produit. Il est déterminé à partir de cette première partie de la courbe (pente à l'origine), où la déformation est essentiellement réversible ;
- ***La phase de compression*** **B-C** : non réversible au cours de laquelle les parois sont fléchies à partir d'une contrainte seuil (σ_c) ;
- L***a phase de densification*** **C-D** où il n'y a quasiment plus d'air dans les alvéoles écrasées et les parois sont compactées.

Par ailleurs, la prédiction du comportement mécanique des produits céréaliers alvéolaires nécessite la prise en considération du rôle des hétérogénéités de leur structure alvéolaire ainsi que de leurs propriétés pariétales (ZGHAL *et al.* 2002). L'un des moyens de quantification des hétérogénéités de la structure alvéolaire le plus utilisé de nos jours est la technique d'analyse d'image.

III.2. Structure alvéolaire de la mie

L'évaluation de la structure alvéolaire des produits de panification se base sur plusieurs critères tels que la taille, la forme des alvéoles ainsi que l'épaisseur de leurs parois

Interprétations	excès				insuffisance			principe de calcul				
observations et notes	1	4	7	10	7	4	1	des notes				
Lissage								x 0,5	/ 5			
Collant de la pâte								x 0,5	/ 5			
Consistance												
Extensibilité								x 0,5	/ 5			
Elasticité								x 0,5	/ 5			
Relâchement								x 0,5	/ 5			
PETRISSAGE								total =	/ 25	x coef (*)	=	/ 25
Pousse en cuve												
Détente : relâchement								x 1				
POINTAGE								total =	/ 10			/ 10
Extensibilité: allongement								x 0,5				
Extensibilité : déchirement								x 0,5				
Elasticité								x 0,5				
Collant de la pâte								x 1				
FACONNAGE								total =	/ 25	x coef (*)	=	/ 25
Développement								x 0,5				
Déchirement								x 0,5				
APPRET								total =	/ 10			/ 10
Collant de la pâte								x 1				
Tenue								x 2				
MISE AU FOUR								total =	/ 30	x coef (*)	=	/ 30
principes des mesures § 3.1.2.										total pâte		/ 100
Volume des pains								total =	/ 30			/ 30
Section								x 1				
Couleur								x 2				
Epaisseur								x 0,5				
Croustillant								x 0,5				
Coup : ***Développement***								x 1				
de : Régularité								x 1				
lame : Déchirement								x 1				
ASPECT DU PAIN								total =		x coef (*)	=	/ 70
Principe des mesures § 2.5.										total pain		/ 100
Couleur								x 1				
Texture : Souplesse								x 1				
Elasticité								x 1				
Collant								x 1				
Alvéolage : Régularité								x 1				
Epaisseur								x 1				
Odeur : Flaveur								x 4				
ASPECT MIE								total =		total mie		/ 100
Principe des mesures § 2.5.								valeur boulangère				/ 300

Figure 43. Grille de présentation des résultats de l'essai de panification (ROUSSEL et CHIRON 2002).

KAMMAN (1970). Plusieurs méthodes d'analyse ont été développées dans ce contexte tels que le classement qualitatif par notation d'un jury d'experts. Cependant, cette technique reste subjective et donc peu précise (SCANLON and ZGHAl 2001). Plus récemment, une autre approche se basant sur la morphologie mathématique a été utilisée pour des biscuits extrudés par SMOLARZ *et al*, 1989 ainsi que pour l'étude de pains français par ROUILLE *et al.*, 2005 et LASSOUED 2005. Le classement des structures alvéolaires par une analyse en composantes principales a permis d'expliquer plus de 80% de la première composante, qui est directement reliées à la taille des bulles gazeuses. L'Imagerie par Raisonnance Magnétique (IRM), présente l'avantage de récupérer les images 2D à partir d'autres en 3D avec une très haute résolution et sans bruits de fond (TAKANO *et al.* 2002 ; NAITO *et al.* 2003). Cette technique a été utilisée aussi bien pour le suivi de la structure alvéolaire au cours de la fermentation que pour l'évaluation de la texture des mies.

III.3. Propriétés organoleptiques

L'évaluation des propriétés organoleptiques des pains a été approchée par plusieurs techniques telle que le système de classement des produits par notation (ROUSSEL 1989). ROUSSEL et CHIRON 2002 citent l'exemple le plus utilisé qui est celui de la grille de notation (Figure 43) de la méthode BIPEA normalisée en 2002 (AFNOR V03-716). SETSER 1996, a utilisé le test triangulaire pour l'évaluation du rassissement des produits céréaliers et la détermination de la période de stockage critique d'un produit à partir de laquelle le consommateur le différencie d'un produit frais. Toutefois, ce test ne donne pas la nature des différences sensorielles observées. Pour répondre à ce type de questions, les mesures descriptives sont employées. Les plus utilisées de nos jours sont :

- **La technique du profil classique** consiste à présenter aux sujets différents échantillons (espace produit) qui' ils doivent évaluer de façon séquentielle. Chaque produit est caractérisé selon des descripteurs à l'aide d'une échelle. Cependant, l'application de cette technique nécessite le passage dans un premier temps par une étape de consensus sur le vocabulaire des descripteurs suivie par une étape d'entraînement du panel puis par l'étape d'évaluation elle même (GAMBARO *et al.* 2002 ; BAARDSETH *et al.* 2000). Cette méthode présente l'avantage de fournir une description consensuelle précise et détaillée, mais sa mise en place reste cependant longue et coûteuse (SIEFFERMANN 2000).
- **La technique du profil libre** propose une approche d'évaluation plus rapide et moins coûteuse à mettre en œuvre que le profil classique. La spécificité de cette technique repose sur

un gain de temps par élimination de l'étape de génération des descripteurs. Ces méthodes permettent ainsi de préserver les différentes sensibilités individuelles (QUARMBY and RATKOWSKY, 1988), mais au détriment de la compréhension du vocabulaire des descripteurs. Par ailleurs, la condition d'application de cette méthode est d'avoir un jury entraîné pour ce type d'évaluation.

IV. CAS DE LA PANIFICATION SANS GLUTEN

En panification, lorsque les propriétés fonctionnelles des ingrédients de base ne suffisent pas à donner aux pâtes les caractéristiques requises pour la réussite des pains, les spécialistes font appel à des améliorants les que les hydrocolloïdes et les émulsifiants.

Les hydrocolloïdes tels que les gommes arabiques, de guar, de caroubiers et de xanthanes, les carraguénanes, les alginates, les pectines et les dérivés cellulosiques, sont des polysaccharides (METTLER and SEIBEL 1993 ; GUARDA *et al.* 2004 ; ROSELL, ROJAS and BENEDITO 2001 ; SHARADANANT and KHAN 2003 ; BÁRCENAS and ROSELL 2005). Leurs propriétés fonctionnelles permettent de les utiliser comme agents épaississants, stabilisants d'émulsions, inhibiteurs de synérèses, améliorants de la capacité de rétention d'eau et des propriétés texturales, pour la formation de films et de gels, pour contrôler la mobilité de l'eau, et en général pour augmenter la durée de conservation des pains en retardant le rassissement et en les gardant fais le plus longtemps possible (CHRISTIANSON *et al.* 1981 ; DZIEZAK 1991 ; SCHENZ 1995 ; WARD and ANDON 2002).

De nombreuses études ont été menées quand à l'ajout d'hydrocolloïdes en panification. Par exemple le Carboxyméthylcellulose (CMC) et les gommes de guar ont été additionnés à des pains à base de seigle en vue d'améliorer leur qualité (METTLER and SEIBEL 1995). D'autre part, une amélioration de la stabilité des pâtes est notée au cours de l'étape de fermentation avec les alginates, les carraguénanes, les gommes de xanthanes et les Hydroxypropylméthylcelluloses (HPMC) (ROSELL, ROJAS and BENEDITO 2001). Toutefois, les dérivés cellulosiques, majoritairement l'HPMC sont reconnus pour être les hydrocolloïdes qui confèrent aux pains les meilleures propriétés organoleptiques (COLLAR, ARMERO and MARTÍNEZ 1998 ; COLLAR *et al.* 1999). COLLAR, ont étudié les effets de l'ajout de CMC et d'HPMC sur les pâtes et leurs performances en panification ainsi que leurs interactions avec l'α-amylase et les émulsifiants.

Dans le cas de la fabrication de pains sans gluten, les hydrocollïdes ont été utilisé en tant que substitut de gluten. En 1976, NISHITA *et al*. ont trouvé que l'ajout d'HPMC donnait les meilleurs résultats dans la fabrication de pains de riz. Le Méthylcellulose et les gommes arabiques ont été employés avec succès par TOUFEILI *et al.* 1994 dans la formulation de pains sans gluten. MI, HYUN et HAE (1997a, 1997b et 1997c), montrent que certains hydrocolloïdes ajoutés à différents taux aux farines exemptes de gluten (1 à 4,5% d'HPMC, 1,5% de graines de caroube et 1 % pour chacune des gommes de carraguénane, de guar, de xanthane et d'agar), donnaient lieu à des pains avec des volumes spécifiques de pains optima. Plus récemment, SIVARAMAKRISHNAN *et al.* en 2004, ont étudié les propriétés rhéologiques de pâtes de riz en vue de panification. Les pains ayant donné les expansions optimales après cuisson sont ceux obtenus avec des farines de riz long avec 3% d'HPMC ajouté.

Les dérivés cellulosiques (méthylcellulose, carboxyméthylcellulose et l'hydroxyméthylcellulose), sont obtenus par des modifications chimiques de la cellulose (GUARDA *et al.* 2004). L'hydroxypropylméthylcellulose (HPMC) est obtenu par l'addition de groupements méthyls et hydroxypropyles à la chaine de cellulose caractérisant le polymère par d'importantes surfaces actives et des propriétés uniques d'hydratation-déshydratation lorsqu'il est en solution et au cours des changements de température (BÁRCENAS and ROSELL 2005). D'après SARKAR and WALKER 1995, malgré la présence de groupement hydrophobes dans les chaînes d'HPMC, ces polymères maintiennent les propriétés hydrophiles de la cellulose. Ces propriétés permettent à l'HPMC d'agir en tant qu'émulsifiant qui diminuerait la tension superficielles aux différentes interfaces et de renforcer le grain de mie et d'augmenter sa rétention en eau (BELL 1990 ; DZICZAK 1991).

BELL 1990, était parmi les premiers auteurs à formuler des hypothèses concernant le mécanisme d'action de l'HPMC et son habilité à améliorer le volume des pains. Cet auteur rapporte que lorsque les chaînes hydratées de ce polymère sont soumises à un traitement thermique, elles relâchent les molécules d'eau qui y étaient attachées donnant lieu à de fortes interactions entre elles. En conséquence, un réseau temporaire est formé. Ce réseau donne aux cellules gazeuses de la force au cours de la fermentation et leur permet l'expansion au cours de la cuisson et l'amélioration des volumes de pains. (BELL 1990 ; DZIEZAK 1991 ; HAQUE *et al.* 1993 ; SARKAR and WALKER 1995). En plus de ceci, le réseau formé par l'HPMC au cours de la cuisson pourrait agir en tant que barrière à la diffusion des gaz,

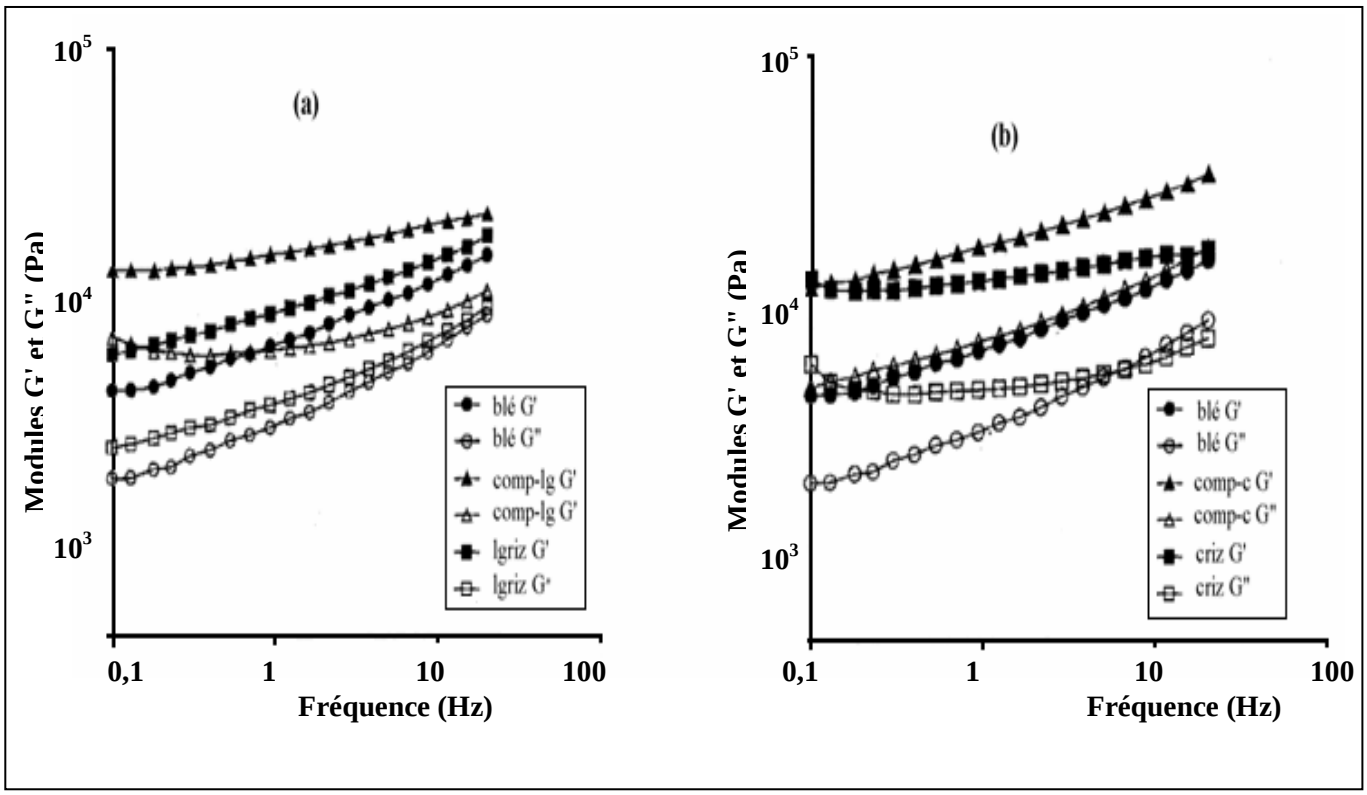


Figure 44 (a-b). Variation des modules élastique (G') et visqueux (G") en fonction de la fréquence pour des pâtes à base de farines de blé tendre (blé), composites (50% riz long-50% blé tendre (comp-lg) ou 50% riz court (comp-c), 100% riz long (lgriz) ou 100% riz court (criz) (SIVARAMAKRISHNAN, SENGE and CHATTOPADHYAY 2004)

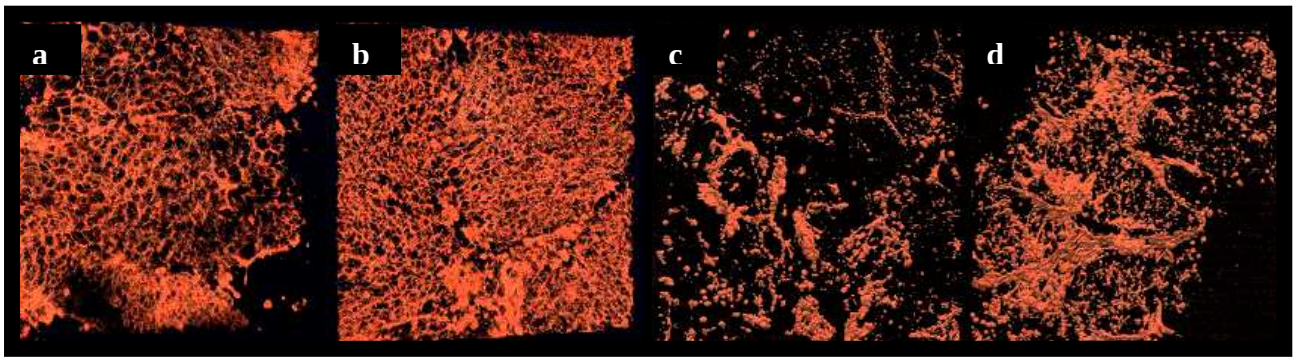


Figure 45. Observations par MCBL de mies de pains sans gluten à base de Blé Noir (BN) et de Riz Brun (RB) (× 40). a : Pain témoin de BN (0 U TGase), b : Pain de BN à 10 U de TGase, c : Pain témoin de RB (0 U TGase), d : Pain de RB à 10 U de TGase (RENZETTI *et al.* 2008).

diminuant ainsi les pertes d'eau par évaporation et augmentant les teneurs en eau des mies ralentissant ainsi le rassissement (BELL 1990 ; DZIEZAK 1991).

IV.1. Propriétés viscoélastiques

L'étude des spectres mécaniques des pâtes se fait à travers l'évolution des modules G' et G" et permet de caractériser les pâtes céréalières en général et de formuler des hypothèses ou tirer des conclusions quand à la structuration de ces pâtes. SIVARAMAKRISHNAN, SENGE and CHATTOPADHYAY 2004, ont suivi par exemple l'évolution des modules G' et G" en fonction de la fréquence d'oscillation (de 20 à 0,1 Hz) de plusieurs types de pâtes sans gluten (100% riz long, 100% riz court), composites (50% blé tendre - 50% riz long ou court), comparées à un témoin de blé tendre. La Figure 44 (a –b) montre que dans tous les cas de figure, les valeurs de G' sont supérieures à celles de G", signalant que ces pâtes sont plus élastiques que visqueuses. Les pâtes de riz pur ont également des valeurs de G' supérieures à celles du témoin de blé tendre probablement en raison de l'absence d'un système de structure bien défini avec l'existence de forces répulsives entre les grains d'amidons. Les mêmes observations sont notées pour les pâtes composites comparées à celles de blé tendre. Dans ce cas de figure, les auteurs attribuent ces augmentations de modules à des différences entre les interactions amidon-gluten dans les farines composites et dans celles de blé tendre. Dans les pâtes, les grains d'amidon renforcent le réseau de gluten en produisant des liaisons fortes au sein de la pâte qui donneraient des valeurs élevées des modules.

IV.2. Microstructure de pâtes

Plus récemment, RENZETTI *et al.* 2008 ont étudié l'effet d'une transglutaminase (TGase) microbienne sur la microstructure de pains sans gluten. Le marquage des protéines a été fait par de la *Rhodamine B.* Pour le pain témoin à base de Blé Noir (BN) à 0U d'enzyme, un réseau protéique continu caractéristique est observé (Figure 45a). L'addition de la TGase (10U) permet d'affiner et de renforcer le réseau protéique (Figure 45b). Concernant le Riz Brun (RB), le pain témoin avec 0U d'enzyme montre l'absence d'un quelconque réseau protéique (Figure 45c) contre une amélioration de la continuité de la phase protéique pour les échantillons avec 10U de TGase (Figure 45d).

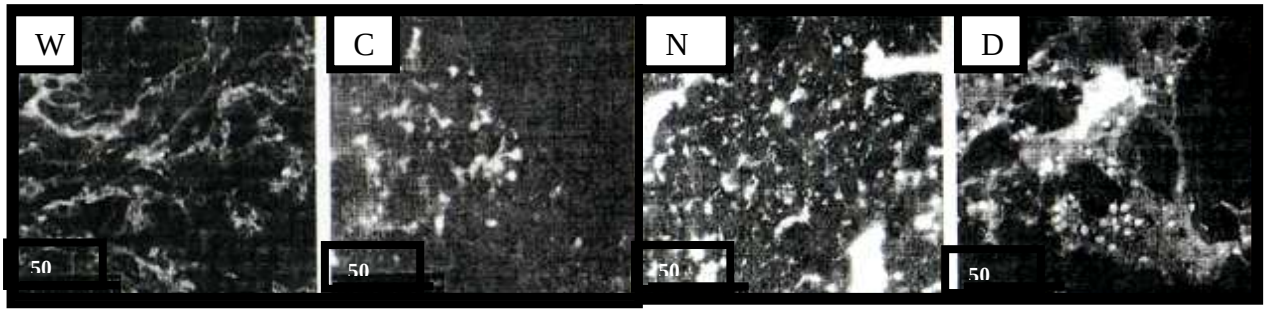


Figure 46. Observations par MBCL de mie de pain témoin à base de blé tendre (W), de mie de pain sans gluten du Commerce (C), de mie de pain sans gluten sans ajout de lait écrémé (ND) et de mie de pain sans gluten additionné de lait écrémé (D) marqués avec de la Safranine O dye (MOORE *et al* 2004).

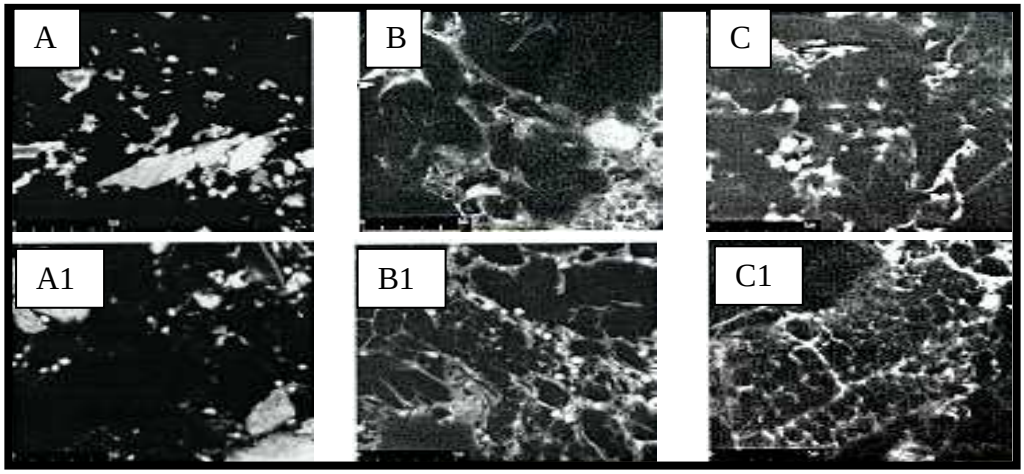


Figure 47. Observations par MBCL de mies de PSG marqués avec de la Safranine O dye. Sans TGase : riz-farine de soja (A), riz-poudre d'œufs (B), riz-poudre de lait écrémé (C) et avec 1 U TGse/g de protéine : riz-farine de soja (A1), riz-poudre d'œufs (B1), riz-poudre de lait écrémé (C1) (MOORE *et al* 2006).

Dans le même contexte d'étude sur des pâtes et Pains Sans Gluten (PSG), MOORE *et al.* 2004 et 2006 ont utilisé la MCBL par marquage covalent pour connaître la répartition des protéines et de l'amidon pour les premiers et pour mettre en évidence la formation de réseaux protéiques après ajout de TGases pour les deuxièmes. Le marquage s'est fait par de la *Safranine O dye* (0,002%, base farine). Lors de ces études, la différenciation entre les protéines et les grains d'amidon s'est faite par contraste. L'identification individuelle des principaux constituants des pains sans gluten (amidon de pomme de terre, amidon de mais, farine de riz brun, farine de blé noir, farine de soja et poudre de lait écrémé) à été faite au préalable par MBCL.

Pour MOORE *et al* 2004, c'est uniquement la mie du PSG avec ajout de lait écrémé (D) qui présente une structure protéique semblable au réseau de gluten tel qu'observé pour le témoin de blé tendre (W). Les structures globulaires sombres incrustées dans ces structures blanches semblent être vides ou déformées représentant probablement des grains d'amidon endommagés et les filament fin les reliant du gluten dénaturé (Figure 46 D et W). D'autre part, MOORE *et al.* 2006, n'ont pas trouvé d'interactions significatives entre les protéines de soja et la TGase (Figure 47 A et A1) dans le cas des PSG riz-farine de soja contre un effet positif avec formation de réseau protéique à raison de 1 U de TGase / g de protéine dans le cas des PSG à base de riz -poudre d'œufs (Figure 47 B et B1) et de riz-poudre de lait écrémé (Figure 47 C et C1).Selon ces auteurs, le taux de TGases nécessaire à la formation d'un réseau protéique dépend de la nature des protéines que vont utiliser ces TGases. Ceci est corroboré par l'effet négatif entre ces enzymes et les protéines de soja. En effet, ces dernières sont connues pour leur faible pouvoir moussant et émulsifiant comparé aux protéines de lait écrémé et d'œufs utilisés dans leurs travaux.

MATERIEL & METHODES
Partie 4

I. MATIERES IMPLIQUEES

I.1. L'eau d'hydratation

L'eau qui a été utilisée en panification et pour les tests effectués au laboratoire de l'I.N.A.T.A-A est une eau distillée obtenue à partir du distillateur LENZ GLASINSTRUMENTE, Mono Dest 3000 d'un pH de 6,14 ± 0,16. Pour les essais réalisés en France au Laboratoire de Biophysique des Matériaux Alimentaires (L.B.M.A.), l'eau distillée utilisée pour la préparation des pâtes à pain destinées aux essais rhéologiques et à l'analyse d'image était une eau distillée déionisée obtenue par le distillateur ELIX 3 (MILLIPORE) avec un pH de 6 ± 0,02.

I.2. La levure boulangère

Il s'agit de la levure *Saccharomyces cerevisiae* de marque "S. I. Lesaffre France". Elle se présente sous forme lyophilisée en paquet de 500g. Celle-ci est mélangée directement aux farines avant hydratation. La température de fermentation utilisée dans ce travail est de 35°C puisque nos panifications se font en moule et ressemblent donc aux pains de mie pour les quels on admet des températures de fermentation entre 30 et 35°C (CHARGELEGUE *et al.* 1994).

I.3. L'HPMC

L'Hydroxypropylméthyle cellulose (HPMC) est un échantillon de Methocel F50 (Dow Chemical, US). Il a été utilisé dans les recettes de pain sans gluten. Ce polysaccharide est obtenu à partir de la cellulose extraite du coton et sur laquelle des groupements hydroxypropylméthyle sont greffés de façon covalente par réaction chimique. Une fois fonctionnalisé dans l'eau, l'HPMC donne un gel à partir de 62-68°C.

I.4. Le sel

Du sel fin de cuisine iodé du commerce produit par l'Entreprise Nationale Algérienne de sel E.N.A.*sel* a été utilisé.

I.5. Les semoules de blé dur, farines de blé tendre et ingrédients exempts de gluten

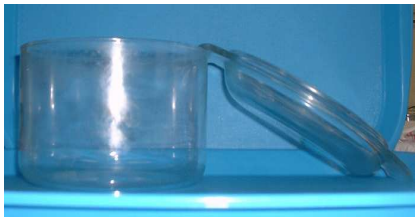
Les semoules de blé dur, farines de blé tendre ainsi que les ingrédients exempts de gluten utilisés dans ce travail sont abordés en chapitre 2, I, page 38.

a$_1$. Pétrin *Kenwood* KM300

b$_1$. Pétrin *KitchenAid Professional* K45SS

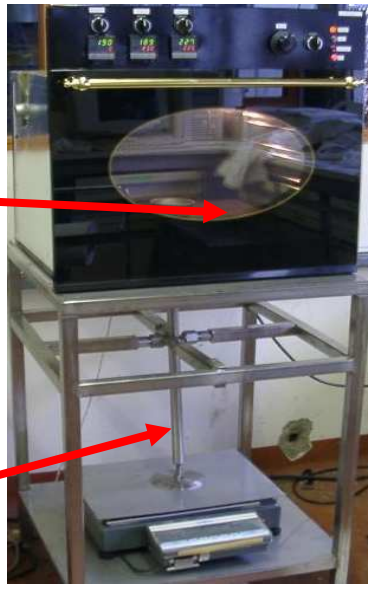
c.Mixographe (USA)

a$_2$. Moule Tefal proflex (10,5 × 5,3 × 4) cm



b$_2$. Moule avec couvercle en pyrex (14 cm de diamètre et 7 cm hauteur)

a$_3$. Four pâtissier (0,60 × 0,90 × 0,18 m), Laboratoire de biochimie I.N.A.T.A.A.



b$_3$. Four instrumenté (0,45 × 0,38 × 0,34 m) Halle de technologie, AgroParisTech, Massy, Paris

Figure 48. Illustration du matériel utilisé **(a)** en panification et **(b)** pour le suivi de la perte de poids et l'expansion des pains au four (A : Crochet pétrisseur pour panification, : Sole thermostatée, C : support de la sole posant sur la balance)

II. MATERIEL DE PANIFICATION

II.1. Les pétrins

Pour les essais de panification au laboratoire pédagogique de biochimie de l'I.N.A.T.A-A., le pétrissage a été effectué à l'aide d'un pétrin de marque *Kenwood* KM300 (Figure 48a_1).

En ce qui concerne les essais de suivi de perte de poids au cours de la cuisson, de l'expansion au four et les tests rhéologiques au laboratoire de Biophysique des matériaux Alimentaires d'AgroParisTech, le mélange des ingrédients a été effectué avec un robot modèle K45SS de *KitchenAid Professional* (Figure 48b_1).

Dans ces deux types de pétrissages, c'est un crochet pétrisseur (Figure 48b_1 (A)) avec une vitesse de 80 tours/min qui a été utilisé.

Pour la préparation des pâtes pour les tests de Microscopie Confocale à Balayage Laser, le Mixograph (AACC, USA) a été utilisé avec une vitesse de 50 tours/min (Figure48c). Cet appareil est muni d'une cuve de 10 g qui comporte trois chevilles fixes. Le couvercle de la cuve comporte quatre chevilles qui tournent et permettent ainsi le cisaillement, la compression et l'extension de la pâte.

II.2. Les moules

Lors des essais de panification au laboratoire pédagogique de biochimie de l'I.N.A.T.A.A., le moule utilisé était en Téfal Proflex (10,5×5,3×4 cm) sans couvercle (Figure 48a_2). En ce qui concerne les essais de suivi de perte de poids au cours de la cuisson, de l'expansion au four tests rhéologiques au laboratoire de Biophysique des matériaux Alimentaires (AgroParisTech.), les essais ont été effectués dans des moules transparents en verre pyrex avec couvercle (Figure 48b_2). Ce dernier permet d'atténuer la formation de gerçures sur les croûtes de pain suite à des dessèchements intenses, puisque pour les tests effectués sur ces moules, les tests effectués au four ont été réalisés en absence de buée.

II.3. Les fours

Les essais de panification sont réalisés sur un four pâtissier thermostaté (0,60×0,90×0,18 m) doté de deux résistances, sole et voute au laboratoire pédagogique de biochimie de l'I.N.A.T.A-A. de Constantine (Figure 48a3).

Concernant les tests de suivi de la perte de poids et de l'expansion des pains, ceux-ci sont réalisés sur un four instrumenté thermostaté (0,45×0,38×0,34 m), se trouvant au niveau de la halle technologique d'AgroParisTech (Figure 48b3).

III. LE PLAN D'EXPERIENCE

A travers cette étude les réponses donnant les caractéristiques rhéologiques de pâtes de la

FRF qui se rapprocheraient le plus de celles des pâtes à pain classique étaient recherchées. Ce critère de sélection ajouté aux propriétés gélifiantes de l'HPMC dans une gamme de température voisine de celle de la thermo-coagulation du gluten devrait permettre d'obtenir une structure alvéolaire dans les pains sans gluten.

Un plan d'expériences central composite à deux variables (teneurs en HPMC (X1) et en eau des pâtes (X2)) a été choisi afin d'obtenir une gamme de consistance de pâtes et des capacités à gélifier plus ou moins importantes. Les propriétés rhéologiques des pâtes ont été systématiquement déterminées aux petites déformations par cisaillement (essais en régime harmonique) et aux grandes déformations par compression–relaxation en conditions lubrifiées. Les grandeurs retenues sont :

- ***Pour les propriétés viscoélastiques (au CSL²100),*** le module conservatif (*G'*), le module dissipatif (G") et *tan* δ (= G"/G') à une déformation de 2×10^{-4} ;
- ***Pour les propriétés de texture (au TA-XT2i),*** l'Indice de Relaxation (*IR*) et le module de Young apparent (Eapp).

Le modèle étudié étant un modèle à deux facteurs, il permet d'estimer les valeurs des coefficients de modèles du second degré traduisant la relation de cause à effet entre les facteurs retenus et la réponse étudiée. Ce plan nécessite la réalisation de 8 expériences représentant des combinaisons de trois niveaux attribués à chacun des deus facteurs tout en prenant les réponses correspondantes. Cinq points centraux (00) ont été ajoutés pour appuyer ce plan d'expériences, ce qui donne un total de 13 essais.

La validité du modèle obtenu est vérifiée par des tests statistiques de signification.

III.1. Modèle mathématique

Le modèle mathématique traduisant la dépendance de chaque réponse *Y* étudiée en fonction des deux variables codées (X1 et X2) s'écrit :

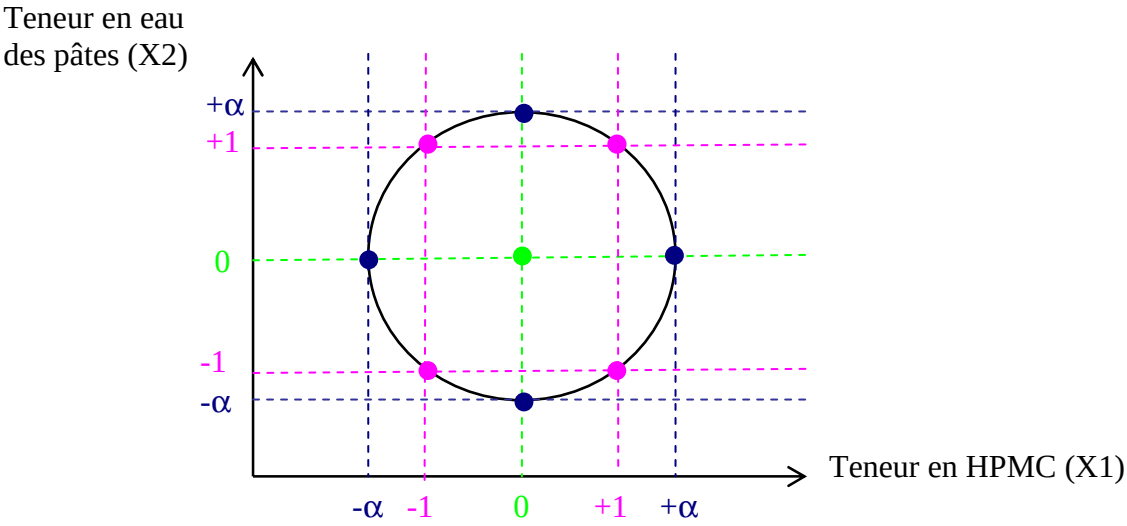


Figure 49 : Représentation graphique du plan expérimental à deux facteur (X1, X2) et trois niveaux (-1, 0 et +1). Les ± α représentent les valeurs extrêmes (max, min).

$$Y = b_o + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1X_1 + b_{22}X_2X_2 + b_{12}X_1X_2$$

III.2. Niveaux des variables

Nous avons attribué pour chaque variable codée (X*i*) les niveaux suivants :

$$-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha.$$

Pour que le plan soit orthogonal, la valeur de α à été fixée à 1,414. Cette valeur qui n'est que le rayon *r* du cercle sur lequel sont représentés les points expérimentaux (Figure 49) permettra le calcul des régresseurs (b_o, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}) des modèles mathématiques indépendamment les uns des autres.

La matrice d'expériences du plan composite orthogonal centré à 2 variables est donnée par le tableau 22.

Tableau 22. Matrice d'expérience du plan composite orthogonal centré à 2 variables

Essais	**Matrice**	
	X1 (HPMC)	**X2 (Hydratation)**
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1,414	0
6	1,414	0
7	0	-1,414
8	0	1,414
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

La représentation graphique des 13 points expérimentaux se fait à travers un cercle sur un tracé bidirectionnel (figure 49).

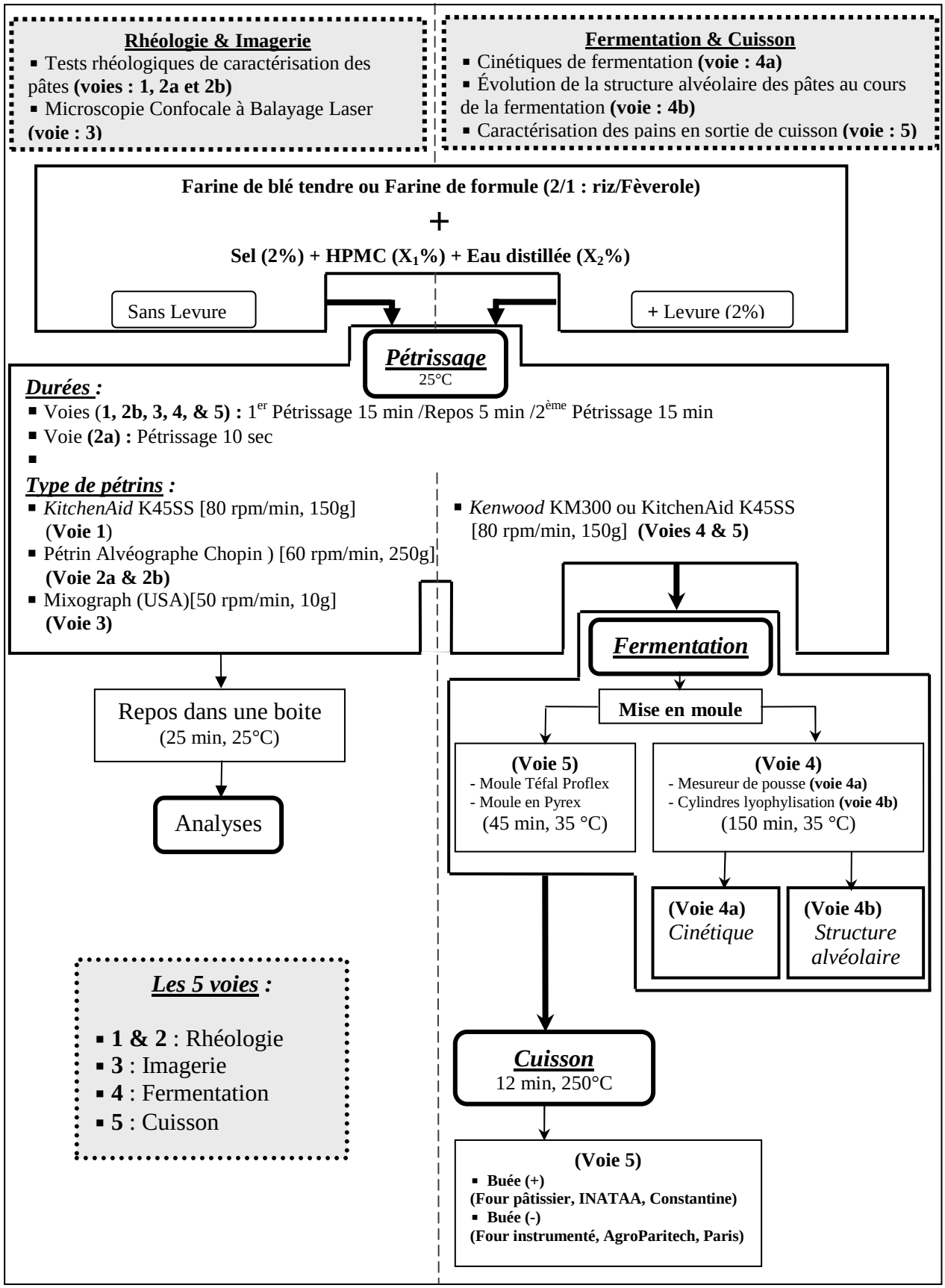


Figure 50. Diagramme montrant les différentes voies d'acheminement des pâtes vers les analyses visées

III.3. Détermination des variables réelles

III.3.1. L'HPMC

Plusieurs études faites par MI, HYUN et HAE (1997a, 1997b et 1997c) ont montré que certains types de gommes utilisées en tant qu'additifs en panification à différent taux (1 à 4,5% d'HPMC, 1,5% des gommes de graines de sauterelles et 1 % pour chacune des gommes de carraghénnanes, de guar, de xanthanes et d'agar), donnaient lieu à des pains de riz réussis avec des volumes d'expansion optima.

Plus récemment, **SIVARAMAKRISHNAN, H. P., SENGE, B. and CHATTOPADHYAY, P. K. 2004,** ont étudié les propriétés rhéologiques de pâtes de riz en vue de fabriquer du pain de riz. Pour ceci, ils ont préparé quatre pâtes : (a) Pure farine de blé (témoin), (b) pure farine de riz (sur la base de deux variétés de riz étudiées), (c) farine composite avec 50% de chacune des farines de riz et de blé et (d) farine de riz additionnée de 1,5, 3,0 et 4,5% d'HPMC. Dans ce travail, les bornes de l'intervalle concernant cette variable ont été choisies égales à 0 et à 4,5% à partir des résultats de la littérature.

III.3.2. L'HYDRATATION

Le choix des taux d'hydratation des pâtes de la formule Riz-Fèverole a été déterminé sur la base d'essais préliminaires (tableau 23).

Tableau 23. Valeurs calculées des variables codées correspondant aux niveaux attribués

variables	Niveaux				
	-1,414	**-1**	**0**	**+1**	**+1,414**
X1 : HPMC (g pour 100 g de formule RF)	0	0,66	2,25	3,84	4,5
X2 : Hydratation (g pour 100 g de formule RF)	90	90,55	91,88	93,20	93,75

RF : formule Riz-Fèverole

IV. OBTENTION DES PATES ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

Sur le diagramme (Figure 50), sont décrites en fonction du type de pâte (avec ou sans levure), les différentes voies parcourues par les échantillons jusqu'à la réalisation des mesures prévues :

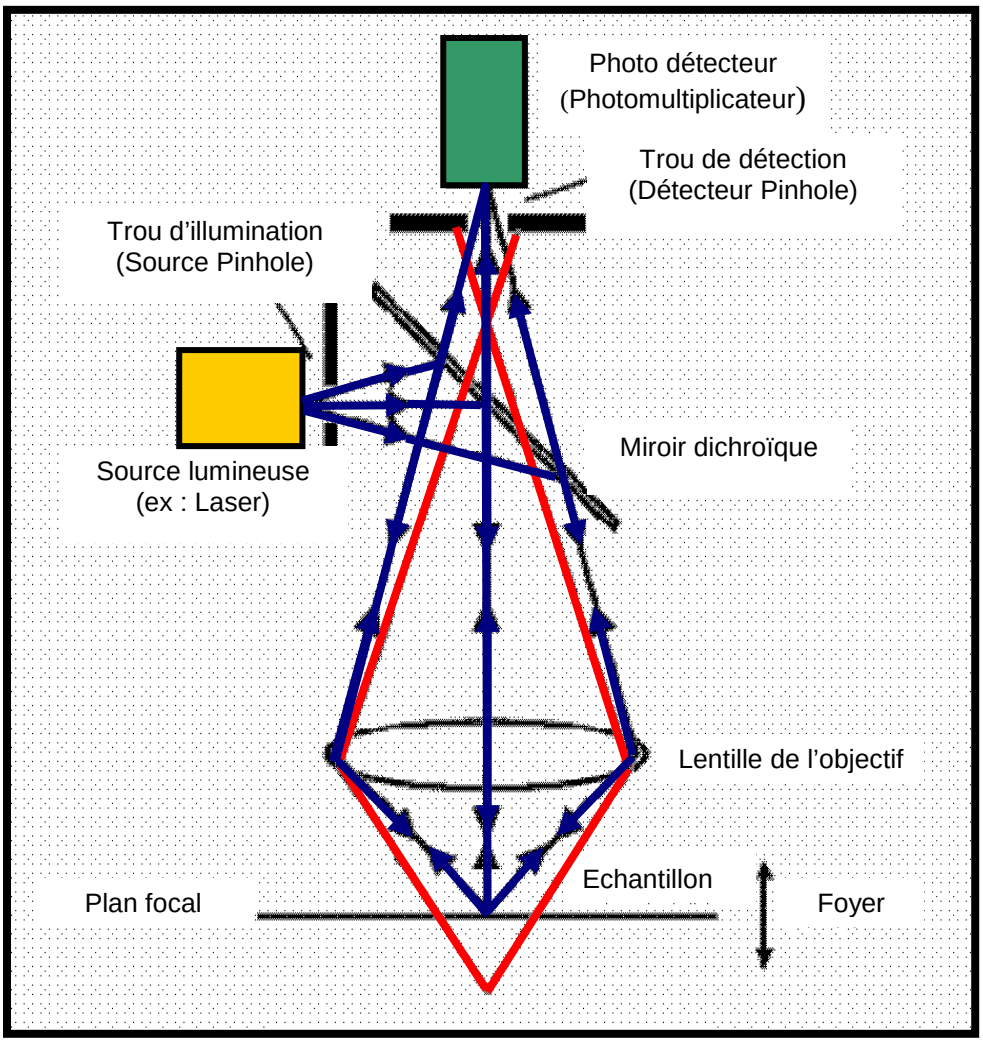


Figure 51. Schéma de principe de la Microscopie Confocale à Balayage Laser (MCBL) (LICHTMAN 1994)

▪ ***Pâtes sans levures*** destinées à l'étude des propriétés viscoélastiques en régime harmonique au CSL^2100 (TA-Instrument, US) (G', G" et tan δ) (Voie 1), à l'étude des propriétés mécaniques (E_{app}, IR) et boulangères (W, G et P/L) respectivement au Texturomètre TAXT-*2i* (Stable Microsystem, UK) (Voie 2a) et à l'Alvéographe (Chopin, France) (Voie 2b) ainsi que la préparation de lames pour les observations par Microscopie Confocale à Balayage Laser (MCBL) (Voie 3).

Pour l'étude des propriétés mécaniques (Voie 2a) et boulangères (Voie 2b), les pâtes on été préparées selon le protocole de la norme ISO 5530-4. Celles-ci sont pétries (mode pétrissage) dans le pétrin de l'alvéographe Chopin respectivement selon les conditions : 10 s, 60 rpm et 8 min, 55 rpm). Après leurs extraction (mode extraction), celles-ci sont laminées 7 fois à l'aide d'un rouleau par des mouvements de va et vient, sur un plateau rectangulaire avec railles dont le fond est en verre. La différence entre les voies 2a et 2b à ce niveau est la lubrification des pâtes pour la première voie avec de l'huile de paraffine (Densité entre 0,86 et 0,89 g/cm^3), acidité (ml NaOH 0,1 N/100g) max 2%, cendres sulfuriques max 0,1%). A l'aide d'un emporte pièce, 5 pâtons sont ensuite découpés (r=23mm, h=6mm) et sont laissés relaxer (20 min, 25°C) dans la chambre de repos de l'Alvéographe Chopin.

▪ ***Pâtes avec levures*** destinées à l'étude des cinétiques de fermentation au mesureur de pousse (Voie 4a) et par la technique de lyophilisation des pâtes (Voie 4a), à suivre l'évolution de la structure alvéolaire des pâtes au cours de la fermentation de pâtes lyophilisées (Voie 4b) et à la caractérisation des pains en sortie de cuisson (analyse d'image de la structure alvéolaire des mies, volume spécifique des pains) (Voie 5).

V. CARACTERISATION DES PATES

La caractérisation des pâtes a concerné l'étude de leur microstructure, de leurs propriétés mécaniques, viscoélastiques et boulangères.

V.1. Microscopie confocale à balayage laser

V.1.1. Principe

La microscopie confocale à balayage laser (MCBL) permet de pratiquer des coupes optiques virtuelles dans l'objet, d'observer, sur une très faible profondeur de champ (400-600 nm) et de n'enregistrer que l'image de la fluorescence émise dans le plan (Figure 51). En positionnant le plan focal de l'objectif à différents niveaux de profondeur

dans l'échantillon, il est possible de réaliser des séries d'images bidimensionnelles à partir desquelles on peut obtenir une représentation tridimensionnelle de la microstructure de l'objet. L'objet n'est donc pas directement observé par l'utilisateur ; celui-ci voit une image recomposée par ordinateur (LICHTMAN 1994).

Un rayon laser excitateur pénètre dans l'échantillon déjà marqué avec des fluorochromes. Le choix de ces derniers est fonction de leur affinité pour les composants à localiser dans l'objet. Il y a alors émission des rayons fluorescents provenant de différents plans de la pénétration. Grâce à un diaphragme variable ou "pinhole" qui élimine le signal fluorescent provenant d'autres plans, il est possible de sélectionner les rayons émis par un seul plan de la préparation. Ces rayons passent alors à travers un bloc de filtrage des longueurs d'ondes, puis arrivent à un système de détection par photomultiplicateurs. Le signal reçu est converti en signal numérique permettant la reconstitution de l'image (WHITE *et al.* 1987).

La plupart du temps, la source d'excitation utilisée n'est plus une lampe à arc, mais un ou plusieurs faisceaux laser. L'intérêt des lasers est de fournir une lumière monochromatique plus spécifique et facile à filtrer. Les lasers les plus fréquemment utilisés avec leur longueur d'ondes spécifiques sont l'argon-ion (457, 488 et 514 nm), l'hélium-néon (543 et 633nm)

La MCBL a été utilisée dans ce travail afin de visualiser la répartition des protéines, de l'amidon et des cellules gazeuses des pâtes à pain sans gluten. Le protocole de marquage des protéines utilisé est celui proposé par MOORE *et al.* (2004) qui avaient comparé la texture de plusieurs pâtes à pain et pains sans gluten. Le marquage des protéines et de l'amidon réalisé à l'aide d'une solution de Safranine O dye (SIGMA-ALDRICH, Germany à 99% de Dye) à un taux de 0,002 % (m/m) est de type non covalent.

V.1.2. Mode opératoire

Un petit échantillon de pâte est prélevé à l'aide d'une spatule et déposé dans l'écarteur placé sur une lame. L'échantillon est délicatement étalé afin de limiter les déformations de la structure de la pâte. Une goutte de la solution de marquage à la Safranine O-dye est déposée sur le morceau de pâte. Le tout est recouvert par une lamelle qui adhére à l'écarteur. Un repos au noir pendant 2 heures est nécessaire, afin que le marqueur diffuse à l'intérieur de la pâte. Les observations sont réalisées avec un objectif ×10 (air) à 20°C au microscope SP2 AOBS –

Figure 52. Microscope confocale à balayage laser

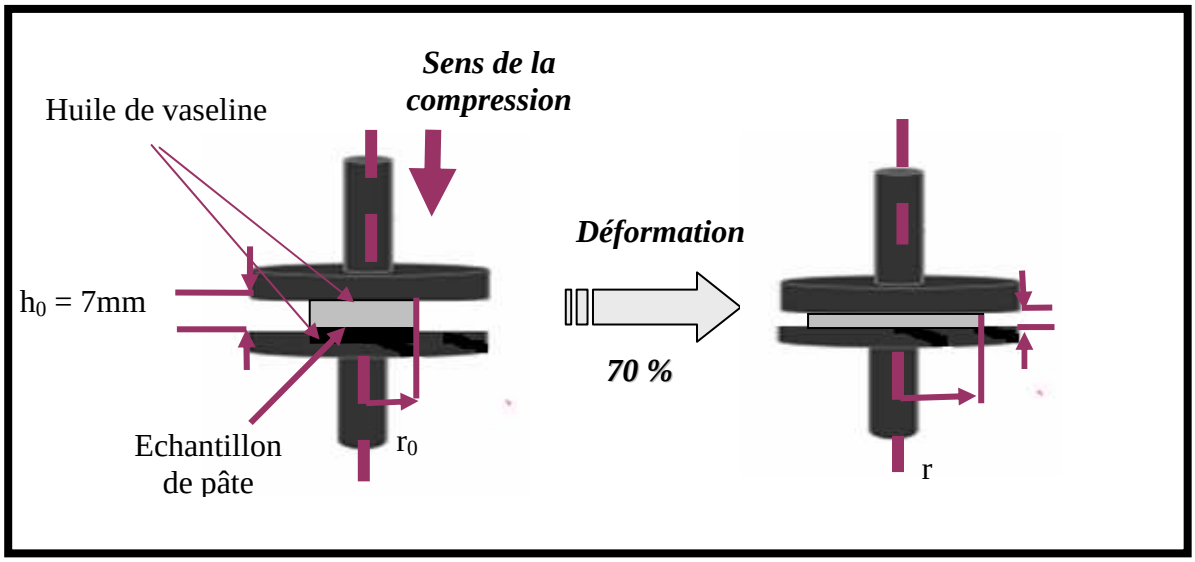


Figure 53. Schéma de principe de compression à volume de pâte constant en conditions lubrifiées (STEFFE 1996)

LEICA–Allemagne (Figure 52). Les images en fluorescence (λ_{exc} =488 nm, λ_{em} =540 nm)[1] sont obtenues par un balayage en $\mathcal{Z}$ de l'échantillon, le long de l'axe optique avec un pas de 10 µm. Le laser utilisé comme source d'excitation est l'argon-ion.

V.1.3. Expression des résultas

L'interprétation des microphotographies obtenues par MCBL est fonction du type de marqueur utilisé. La Safranine O dye a été utilisée dans ce travail pour marquer le réseau de gluten dans les pâtes témoin à base de blé tendre et pour illustrer la répartition des protéines dans les pâtes sans gluten. L'amidon est différencié des autres composants par des essais sur des solutions témoins.

V.2. Propriétés mécaniques des pâtes par compression biaxiale en conditions lubrifiées : Squeezing flow

V.2.1. Principe

La compression en conditions lubrifiées à pour principe de comprimer un échantillon avec une machine de traction/compression assurant un écoulement équibiaxial (STEFFE 1996). Pour cela, un certain nombre de conditions doivent être remplies (Figure 53) :

- L'échantillon doit être sous forme cylindrique d'épaisseur "L" et de rayon "r" ;
- La surface de l'échantillon doit être parfaitement lubrifiée avec une huile afin d'assurer le glissement à la surface des plateaux. Dans le cadre de cette étude, la viscosité de l'huile de vaseline utilisée était, à 25°C de 150 Pa.s.

V.2.2. Mode opératoire

La préparation des échantillons pour les essais de compression en conditions lubrifiées a été décrite plus haut (§ IV) pour la fabrication de pâte non levurée (voie 2a, Figure 50). Après un repos de 25 min, les échantillons sont par la suite placés successivement dans un cristallisoir en verre à double enveloppe qui permet la régulation de la température en étant relié à un bain-Marie entouré d'un isolant. Les tests sont effectués à 25°C.

Les surfaces du fond du cristallisoir et de la sonde de mesure sont induites par une fine couche d'huile de vaseline (1mm d'épaisseur). Un appareil de traction/compression

[1] λ_{exc} : Longueur d'onde d'excitation
λ_{exc} : Longueur d'onde d'émission

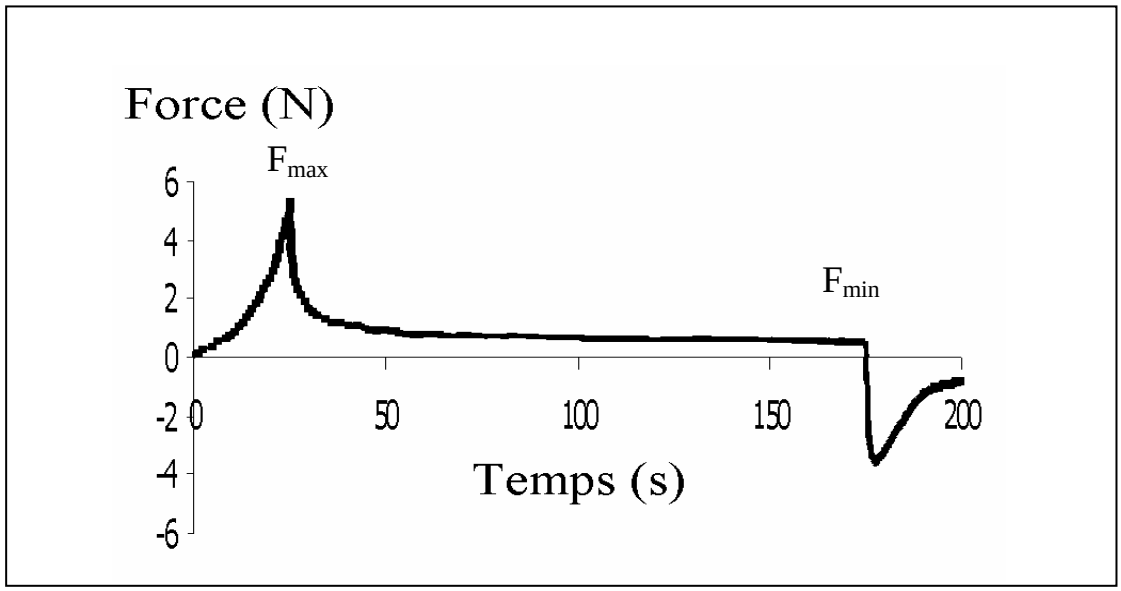


Figure 54. La Force F (N) en fonction du temps de compression sur des pâtes à pain.

(TA.XT2i- Stable Micro Systems –Royaume-Uni), permet le pilotage d'une sonde qui va compresser l'échantillon de pâte pour y être en contact avec elle sur toute la surface de l'échantillon. Durant la mesure, la traverse qui est en aluminium, descend à une vitesse prédéterminée (0,2 ; 0,5 ; 1 ; ou 2 mm/s) sur une distance de 5 mm soit une compression à 70 % (phase de compression, grandes déformations) puis reste dans cette position pendant tout le reste de l'essai (phase de relaxation de contrainte). Chaque test dure 5 min.

Afin d'assurer des essais de compression en conditions lubrifiées à volume constant, un plateau supérieur de diamètre (120mm) plus imporatnt que celui des disques de pâtes (46mm) a été utilisé (Figure 53), tel que décrit dans la littérature (CHATREI *et al.* 1981). Une répétition de quatre essais pour chaque mesure permet de se situer à une erreur inférieure à 2% (LASSOUED 2005).

V.2.3. Expression des résultats

Les courbes donnant la force F (N) en fonction du temps (s) est tracée (Figure 54). L'Indice de Relaxation (IR) et le Module de Young apparent (Eapp) de pâtes à pain sont déterminées graphiquement. L'IR est donné par :

$$IR = \frac{(F_0 - F_{2,5min})}{F_0}$$

Où F_0 est la force maximale appliquée en début de relaxation, et $F_{2,5min}$ est la force mesurée après 2,5min de relaxation, soit la force minimale.

Le module de Young apparent (E_{app}) donné en Pa est déterminé graphiquement à partir de la pente à l'origine de la courbe donnant la force en fonction de la distance de pénétration (d) multipliée par le rapport de la hauteur initiale du disque de pâte (H_0) sur la surface de celui-ci (A) en accord avec l'équation :

$$E_{app}\ (Pa) = \left(\frac{F_0}{d} \times \frac{H_0}{A}\right)$$

Où : $H_0 = 7\times10^{-3}$ m, $A = \pi\times r^2 = 3,14 \times(23\times10^{-3})^2 = 1,66\times10^{-3}$ m^2

Cette équation devient alors :

$$E_{app}\ (Pa) = (Pente \times 4,21)$$

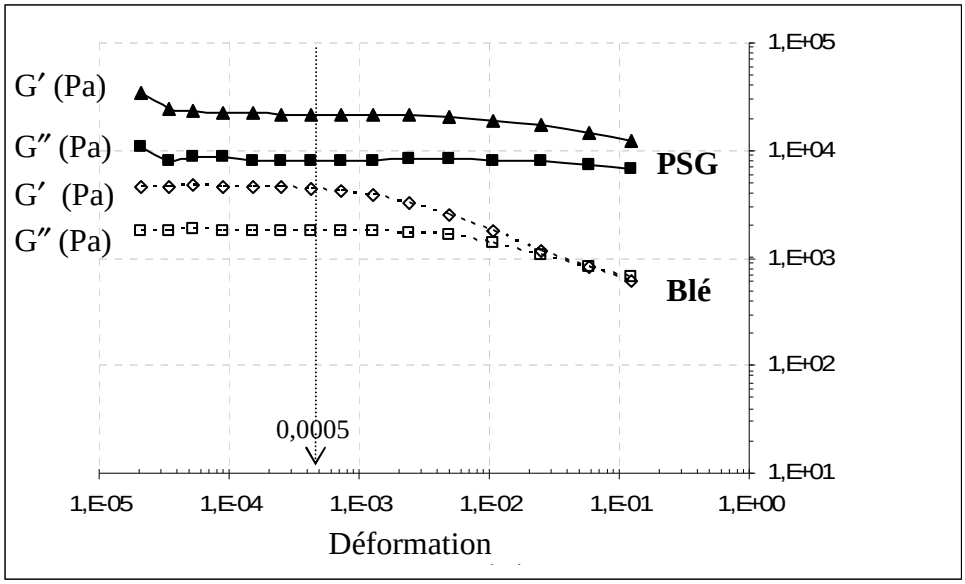


Figure 55. Illustration du domaine de linéarité des pâtes étudiées à une fréquence fixe de 1 Hz (PSG : pâte sans gluten)

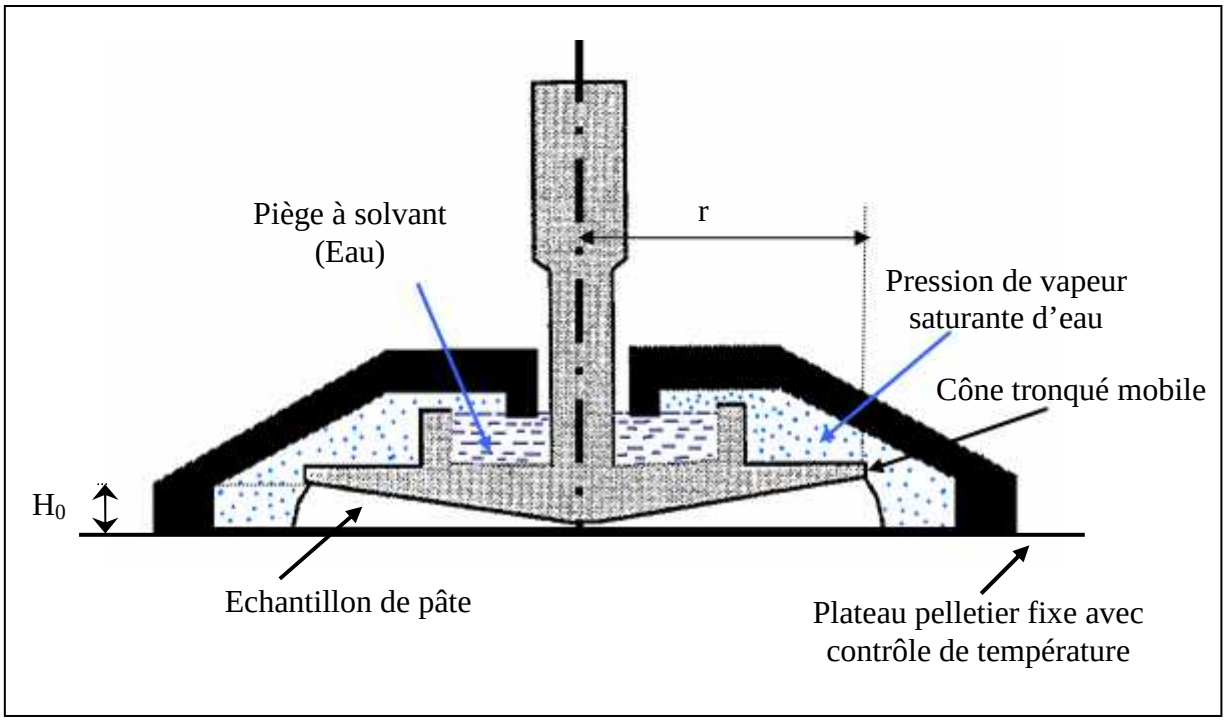


Figure 56. Mise en place de l'échantillon dans l'entrefer du CSL^{2}100 avec dispositif de piégeage d'eau

V.3. Propriétés viscoélastiques en régime dynamique

V.3.1. Principe

L'évaluation des propriétés viscoélastiques des pâtes en régime harmonique passe par la mesure du module conservatif (G'), du module dissipatif (G") et de l'angle de perte tan δ. Une mesure préalable consiste à la délimitation du domaine de linéarité des pâtes. Ce domaine correspond à l'intervalle de contraintes de cisaillement dans lequel il y a proportionnalité entre contrainte et déformation. Dans ce domaine la structure des pâtes analysées est préservée. Cette mesure est effectuée par un balayage en contrainte de cisaillement allant de 0,1 à 100 Pa avec une fréquence fixe de 1Hz. Pour les pâtes sans gluten, le domaine de linéarité se trouve dans la gamme des déformations inférieures à 0,01 (Figure 55). Celui de la pâte témoin à base de farine de blé tendre se trouve à des déformations inférieures à 0,0005 (Figure 55). Une valeur commune de 0,0002 de déformation a été utilisée pour tous les essais de balayage en fréquence.

Les tests de balayage en fréquence (1 à 10 Hz) avaient pour but la mesure des modules conservatif (G') et dissipatif (G") ainsi que de l'angle de perte (tan δ).

V.3.2. Mode opératoire

Les échantillons de pâtes destinés pour les essais rhéologiques en régime dynamique se fait sans ajout de levure et suit la voie 1 (Figure 50). Après un repos de 25 min en fin de pétrissage, l'échantillon est installé dans l'entrefer compris entre un cône et un plateau du CSL^2100 (Figure 56). La pointe du cône étant tronquée, un léger gap entre celle-ci et le plan fixe du plateau pelletier a lieu d'être. Le cône supérieur représente la partie mobile de l'appareil. Une contrainte de cisaillement (rotation du cône) est appliquée. Dans les essais en régime dynamique la contrainte est une fonction sinusoïdale du temps. Un capteur permet de mesurer la rotation du cône, et donc de calculer la déformation subie par l'échantillon.

De petits disques de pâtes sont découpés par des ciseaux puis installés au centre du plateau fixe de l'appareil. La sonde de mesure est un cône tronqué de 4 cm de diamètre avec un piège à solvant (eau). L'excès de pâte est écarté.

D'autre part, le plateau inférieur de cet appareil qui est fixe, est constitué d'éléments pelletiers et d'une sonde Pt100 permettant de mesurer la température. L'ensemble permet de faire varier la température du plateau inférieur, et par conséquent de l'échantillon placé dans

Figure 57. Alvéographe Chopin (Tripette et Renaud Chopin – France)

l'entrefer (–10 et 99°C). Cette fonctionnalité de l'appareil, permet d'effectuer une cuisson sur place d'une pâte à pain afin d'observer les variations des modules G' et G" au cours de la cuisson. Toutefois, il ne faut pas négliger la perte d'eau due à l'évaporation de l'eau dans ce type d'expériences, d'où l'utilisation de piège à solvant.

V.3.3. Expression des résultats

Les courbes donnant G' (Pa) ou G" (Pa) ou tan δ sont tracées en fonction de la fréquence (Hz).

V.4. Propriétés boulangères par l'Alvéographe Chopin

V.4.1. Principe

C'est un moyen d'évaluation de la valeur boulangère des pâtes destinées à la panification et de mesurer leurs force et élasticité à travers leur expansion sous forme d'une bulle par insufflation d'air sous une pression donnée. Ceci est réalisé par l'Alvéographe Chopin (Figure 57) (DEL FRATE 2005).

V.4.2. Choix des pâtes à tester

La caractérisation des propriétés boulangères s'est faite sur quatre types de pâtes :

1. Sur la pâte du témoin de blé tendre. Dans ce travail, ce dernier est considéré comme la référence qui devrait présenter les meilleures caractéristiques alvéographiques (G, W et P/L) aux quelles seront comparées celles des pâtes sans gluten testées ;
2. Sur les matières premières exemptes de gluten (riz, fèverole, pois chiche et pois protéagineux) en vue de les caractériser ;
3. Sur les formules FRF, FRC et FRP en vue d'en choisir une sur la base des meilleures caractéristiques alvéographiques (G, W et P/L) pour la tester en panification ;
4. Une fois la formule choisie, l'application d'un plan d'expérience à deux facteurs [HPMC-Hydratation] basé sur les propriétés mécaniques et viscoélastiques des pâtes sans gluten de celle-ci permettra de faire ressortir les meilleures recettes qui seront caractérisées par des tests à l'Alvéographe Chopin en comparaison aux mauvaises recettes.

Ce test fait l'objet de la norme NF ISO 5530-4, intitulée "Farine de blé tendre-Caractéristiques physiques des pâtes –Détermination des caractéristiques rhéologiques au moyen de l'alvéographe" (NF ISO 5530-4 2003). La quantité d'eau ajoutée pour la

préparation de la pâte est imposée et doit correspondre à 50 g d'eau pour 100 g de farine dont l'humidité est de 15 % (soit 125 g d'eau ajoutés à 250 g de farine de blé tendre).

La recherche des propriétés boulangères de pâtes à base de blé tendre et de formules sans gluten n'a pas permis l'application stricte de la norme NF ISO 5530-4 concernant les niveaux d'hydratation. Nous avons donc travaillé comme suit :

1. Pour les farines de matières premières exemptes de gluten (riz, pois chiche, pois protéagineux et fèverole) ainsi que pour les 3 formules testées (FRF, FRP, FRC), les taux d'hydratation ont été fixés sur la base d'essais préliminaires à l'alvéographe Chopin ayant donné les meilleurs alvéogrammes.

2. Pour les meilleures recettes [HPMC-Hydratation] en panification comparées aux mauvaises, les niveaux d'hydratation ont été imposés par les surfaces de réponses obtenues.

Les taux d'hydratation retenus pour les essais à l'Alvéographe Chopin sont résumés dans le Tableau 24.

Tableau 24. Pâtes préparées pour la caractérisation des propriétés boulangères à l'Alvéographe Chopin (g pour 100 g de farine ou de formule)

Nature de la farine	HPMC (g)	Hydratation (g)
Blé tendre	0	59,65
***Couples [HPMC-Eau] représentatifs des domaines optima* (Meilleures recettes)**	0,33	92,94
Couple 01		
Couple 02	0,82	92,80
Couple 03	1,93	92,70
Couple 04	2,78	93,18
Couple 05	2,78	92,73
Couple 06	3,315	90,47
***Couples [HPMC-Eau] de vérification hors domaines optima* (Mauvaises recettes)**	0,33	90,28
Couple 07	4,17	90,28
Couple 08	4,17	93,46
Couple 09	2,25	91,87
Couple 10		
Matières premières exemptes de gluten		
Riz	0	95,97
Fèverole	0	73,98
Pois Chiche	0	75,43
Pois protégineux	0	80,57
Formules exemptes de gluten*		
FRF	0	88,64
FRC	0	89,12
FRP	0	90,83

* Les taux d'hydratation des formules sans gluten sont obtenus par calcul sur la base de : 2/3 riz + 1/3 légumineuse

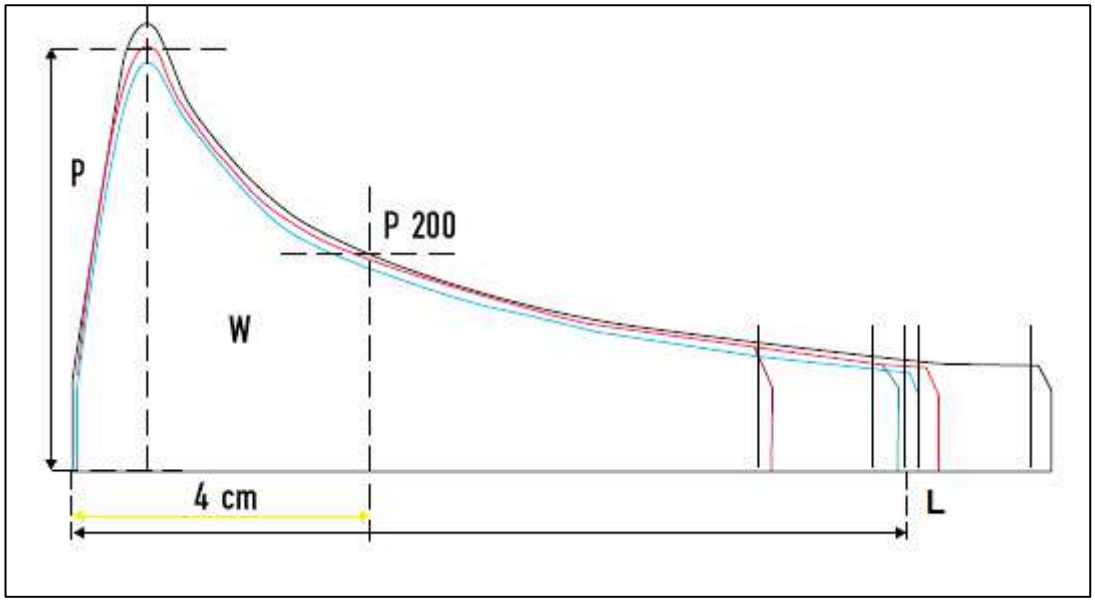


Figure 58. Alvéogramme type d'une pâte à base de blé tendre faite sur l'Alvéographe Chopin (DEL FRATE 2005).

V.4.3. Mode opératoire

Les pâtes destinées aux mesures à l'Alvéographe Chopin ont été préparées sans ajout de levure tel que décrit par la voie 2b (Figure 50). Chaque éprouvette de pâte est testée individuellement. L'Alvéographe Chopin utilisé (Tripette et Renaud Chopin – France) insuffle de l'air sous une certaine pression à l'intérieur de la pâte. Celle-ci s'expanse en bulle. Le temps d'expansion et de résistance à la rupture de cette dernière varie d'un échantillon à un autre. La pression à l'intérieur de la bulle de pâte est enregistrée comme une courbe sur un support en papier. Une courbe moyenne est tracée à partir des enregistrements des 5 pâtons.

V.4.4. Expression des résultats

La lecture d'un alvéogramme (Figure 58) 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 :

$$W\ (\text{joules}) = 6{,}54 \times S$$

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 ordonnés 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 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 cm^3. Il est donné par l'équation suivante :

$$G\ (cm^3) = 2{,}226 \times \sqrt{L}$$

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 :

$$Ie = \frac{P_{200}}{P} \times 100$$

Où P_{200} : Pression à 4 cm du début de la courbe.

Parailleurs, d'après DEL FRATE 2005, il faut prendre l'interprétation des résultats de ces tests avec modération car ils ne peuvent être que prédictifs et ce essentiellement pour deux raisons :

1. La pâte testée est dépourvue de levure et la question qui se pose est aura-t-elle le même comportement avec de la levure ?
2. La pâte testée a une teneur en eau imposée, pas forcément adaptée aux capacités réelles d'hydratation de la farine

Seuls des tests de panification pourront donc confirmer ces hypothèses émises.

VI. ETUDE DES PROCESSUS DE FERMENTATION ET DE CUISSON

VI.1. Suivi de l'expansion gazeuse lors de la fermentation

Le suivi de la cinétique de fermentation des pâtes des formules sans gluten étudiées ainsi que celle du témoin de blé tendre étaient approchées par deux méthodes. La première consistait à suivre l'expansion gazeuse des pâtons par une méthode classique au fermenteur de pousse. La deuxième qui était une technique développée au laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.) consistait à suivre l'expansion gazeuse des pâtons congelés puis lyophilisés. Cette méthode qui à un double objectif consiste à suivre :

1. La fermentation à travers l'expansion gazeuse de pâtons à différents temps de fermentation puis congelés ;
2. L'évolution de la structure alvéolaire de pâtons fermentés lyophilisés.

Les pâtes étudiées pour le suivi du processus de fermentation sont les mêmes que celles testées par l'Alvéographe Chopin (Tableau 24). La comparaison des cinétiques de fermentation obtenues par ces deux techniques vise à valider la nouvelle méthode développée au L.N.T.A. et également à déterminer l'optimum de fermentation de chaque pâte étudiée. Cet optimum correspondrait à l'expansion maximale au cours du processus de fermentation.

VI.1.1. Suivi du volume spécifique au mesureur de pousse

IV.1.1.1. Principe

Le "*mesureur de pousse*" assure le contrôle et le suivi de la cinétique de fermentation. Celle-ci se fait à 30°C sur des pâtes qui fermentent dans un cylindre gradué de 1 à 7 dans un intervalle de temps allant de 0 à 150 min.

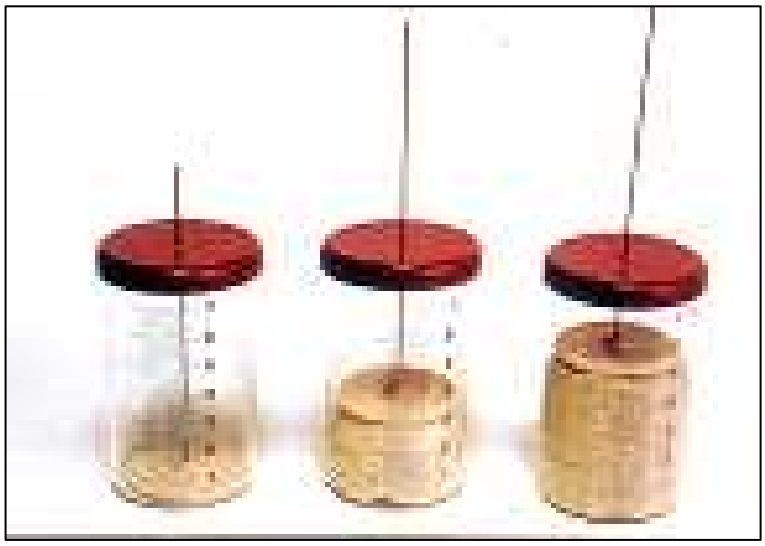


Figure 59. Développement d'une pâte fermentée au mesureur de pousse entre le début (à gauche) et la fin de la fermentation (à droite) (ROUSSEL et CHIRON 2002).

VI.1.1.2. Mode opératoire

Dans chaque mesureur de pousse (figure 59), une boule de pâte de 25 g est aplatie au fond du mesureur au premier niveau de graduation (1cm). Un disque léger est déposé dessus pour maintenir la surface de la pâte bien horizontale durant sa levée. Le disque qui coulisse au fur et à mesure de la fermentation, joue le rôle d'indicateur du niveau de levée de la pâte (ROUSSEL et CHIRON 2002). Chaque cylindre est gradué de 1 à 7cm.

Des essais préliminaires sur les échantillons sans gluten ont permis d'opter pour un temps de fermentation unique avec une durée optimale de 45 min. pour tous les cas.

VI.1.1.3. Expression des résultats

Pour chaque temps de fermentation, l'expansion gazeuse est donnée par la formule suivante :

$$\boxed{EXP\,(\%) = \frac{[(V_f - V_i) \times 100]}{V_i}}$$

Où : *Vi* : Volume d'une pâte avant fermentation à temps t_0 = 0 min

Vf : Volume de la même pâte au temps t_i de fermentation.

VI.1.2. Suivi du volume spécifique et de la structure des pâtes après fixation par congélation et lyophilisation

VI.1.2.1. Principe

Le suivi de la cinétique se fait sur des pâtes fermentées dans un intervalle de temps de 0 à 150 min. à 30°C. Les échantillons de pâtes fermentés sont préservés 24 heures dans de l'azote liquide à –193°C, puis lyophilisés à –57°C sous une pression de 0.05 mbar pendant 10 heures. Une fois déshydratés, ils sont coupés en deux par une fine lame puis pris en vues par un appareil photo numérique. Les différences d'expansion gazeuse sont mesurées et l'évolution de la structure alvéolaire observée sur des prises de vues des pâtes fermentées sans gluten est comparée à celle du témoin à base de blé tendre.:

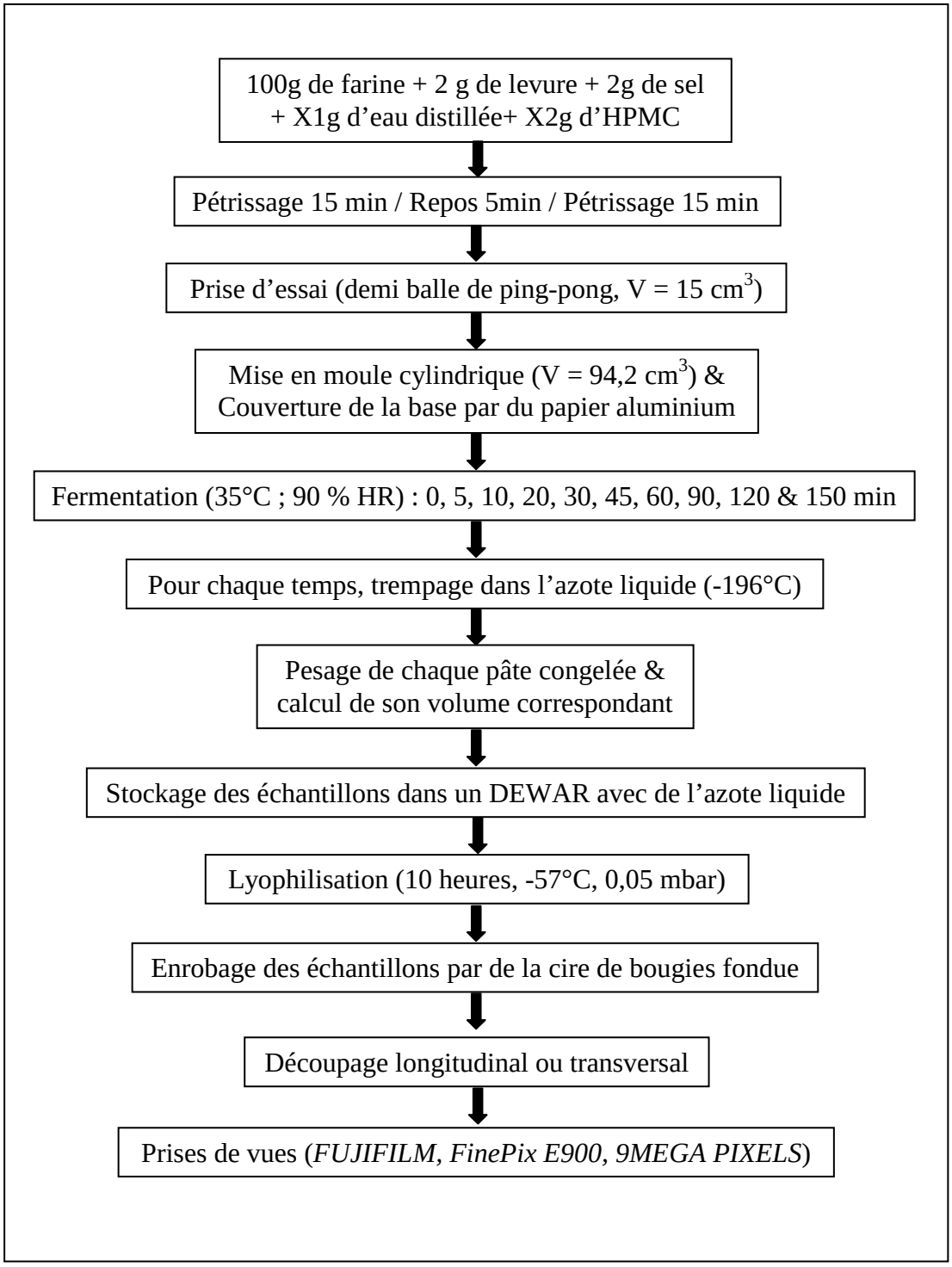


Figure 60. Diagramme de préparation des échantillons pour le suivi des cinétiques de fermentation et de la structure alvéolaire de pâtes lyophilisées (V : volume)

VI.1.2.2. Mode opératoire

A température ambiante (23°C), on ajoute à 100 g de farine de matières étudiées, 2 p. Cent de sel, 2 p. Cent de levure boulangère, X1 p. Cent d'HPMC et X2 p. Cent d'eau distillée (Figure 60). Le pétrissage se fait en deux temps de 15 min chacun, séparés par un repos de 5 min. On prend par un emporte pièce semi- sphérique de volume calculé connu (15 cm^3), un échantillon de pâte qu'on arase par une lame fine. Mettre chaque échantillon dans un moule cylindrique de 4,0cm de diamètre et de 7,5cm de hauteur, dont la base est couverte par du papier aluminium. Préparer ainsi 10 échantillons correspondant aux temps de fermentation : 0 ; 5 ; 10 ; 20 ; 30 ; 45 ; 60 ; 90 ; 120 et 150 min. Mettre les échantillons de pâte dans l'étuve de fermentation (Herams), à 35°C et à 90 % HR.

Les échantillons de pâtes utilisés pour le tracé des cinétiques de fermentation sont préservés 24 heures dans l'azote liquide à –196 °C, puis lyophilisés (ALPHA1-4 CHRIST) à - 57°C, sous une pression de 0.05 mbar pendant 10 heures. Une fois déshydratés, ils sont recouvert par de la cire de bougies. Pour chaque temps, deux échantillons sont préparés et coupés respectivement longitudinalement et transversalement puis découpés en deux par une fine lame. Les coupes sont prises en vues par un appareil photo numérique (*FUJIFILM, FinePix E900, 9MEGA PIXELS*).

Les résultats de suivi de fermentation présentés dans la partie résultats et discussion font ressortir un temps optimum de fermentation de 45 min. Ce temps sera appliqué pour la préparation des pâtes avec et sans gluten pour les tests de panification.

VI.1.2.3. Expression des résultats

Pour chaque temps, prendre délicatement le support cylindrique et le plonger immédiatement dans de l'azote liquide (-196°C) pendant au moins 1 min afin de figer la structure. Procéder à la mesure du volume des pâtes fermentées surgelées. L'expansion gazeuse est donnée par la formule suivante :

$$\mathrm{EXP}\,(\%) = \frac{[(V_f - V_i) \times 100]}{V_i}$$

Où : *Vi* : Volume d'une pâte fermenté avant congélation et avant fermentation, à temps t_0 = 0 min *Vf* : Volume de la même pâte mais congelée dans de l'azote liquide au temps t_i de fermentation.

VI.2. La cuisson

Dans ce travail, deux tests de cuisson sont décrits :

1. Tests de panification conduits au laboratoire pédagogique de biochimie de l'I.N.A.T.A.A ;
2. Suivi des cinétiques d'expansion et de perte de poids dans un four instrumenté de la halle technologique d'AgroParisTech, Massy, Paris.

VI.2.1. Tests de panification

Les tests de cuisson des échantillons sont faits après 45 min. de fermentation dans un four pâtissier du laboratoire de pédagogie de l'I.N.A.T.A.A. de Constantine. L'opération se déroule à 250°C en présence de buée. Elle s'achève au bout de 12 min, après l'obtention d'une croûte bien colorée. Des essais préliminaires ont permis de montrer que des tests de cuisson en absence de vapeur d'eau entraînaient la fissurations de la surface des pâtons. Ces gerçures, qui se forment apparemment en début de l'opération, engendrent un affaissement marqué des pains sans gluten même levés au cours de la fermentation.

VI.2.2. Suivi de la cinétique d'expansion et de perte de poids au four

Le suivi de la cinétique d'expansion et de perte de poids au cours de la cuisson c'est fait sur un four domestique instrumenté au niveau de la halle technologique d'AgroParisTech, massy, Paris. Ce dernier est doté de trois groupes de résistances réparties en haut, en bas et au fond de la chambre de cuisson afin d'assurer une diffusion homogène de la chaleur.

Un système de mesure de la masse au cours de la cuisson a permis de suivre la cinétique d'évaporation de l'eau des pains produits. La sole du four repose par l'intermédiaire d'un support vertical sur une balance (Mettler-France : 12 ± 0,1 kg maximum). Les expériences de suivi de l'évolution de la température au sein de la pâte en moule sont effectuées à l'aide d'un thermocouple placé à 2 cm du fond du moule.

Le four est relié à un ordinateur où le logiciel LabVIEW, développé par SOMMIER (SOMMIER *et al.* 2005), assure la régulation de la température, l'acquisition de la masse du produit en continu et le suivi de la variation de la température mesurée par le thermocouple au sein du produit.

Tous les tests de cuisson sont conduits à 250°C pendant 12 min après 45 min de fermentation à 35°C. Par ailleurs, la buée n'a pas été utilisée dans le cas du suivi de la perte de poids des pains au four car celle ci déstabilise l'équilibre de la balance reliée à la sole de l'appareil de cuisson.

Refroidissement

En fin de cuisson, les pains étaient démoulés et reposaint pendant 1heure de temps sur une grille placée sur la paillasse en vue d'une caractérisation physique (volume spécifique pain, texture de la mie et structure alvéolaires des pains). La température moyenne des laboratoires où les tests ont été effectués avoisinait 25 ± 1°C.

VII. CARACTERISATION DES PAINS OBTENUS

La caractérisation des produits de cuisson s'articule autours de trois principaux points :

1. Mesure des volumes spécifiques des pains et des mies ;
2. Evaluation des propriétés mécaniques de la mie par compression/relaxation au TA.XT2i
3. Analyse de la texture de la mie par la morphologie mathématique

VII.1. Mesure des volumes spécifiques des pains

VII.1.1. Principe

Le volume spécifique des pains (cm^3/g) est mesuré indirectement par déplacement de grains solides sphériques de volume spécifique connu dans une éprouvette de volume connu.

VII.1.2. Mode opératoire

Prendre un récipient de volume plus grand que celui des pains et le remplir à ras avec des grains solides sphériques de volume spécifique connu (0,68 cm^3/g), de préférence de couleur noire pour assurer un maximum de contraste entre les pains, les mies et les grains sphériques. Déterminer le volume spécifique de ce récipient en pesant son contenu en grains dans une balance technique (Sartorius, $10^{-2}g$) et en mesurant son volume (500 ml). Pour la mesure en elle même, on vide à moitié le récipient de son contenu en grains sphériques, on place notre pain et on verse dessus le reste du contenu en grains. Après arasement de la surface de la boite de mesure, on récupère les grains sphériques débordants. Leur volume spécifique correspond à celui des pains.

Figure 61. Test de caractérisation des propriétés mécaniques par le test de compression/relaxation de la mie au TA.XT2i

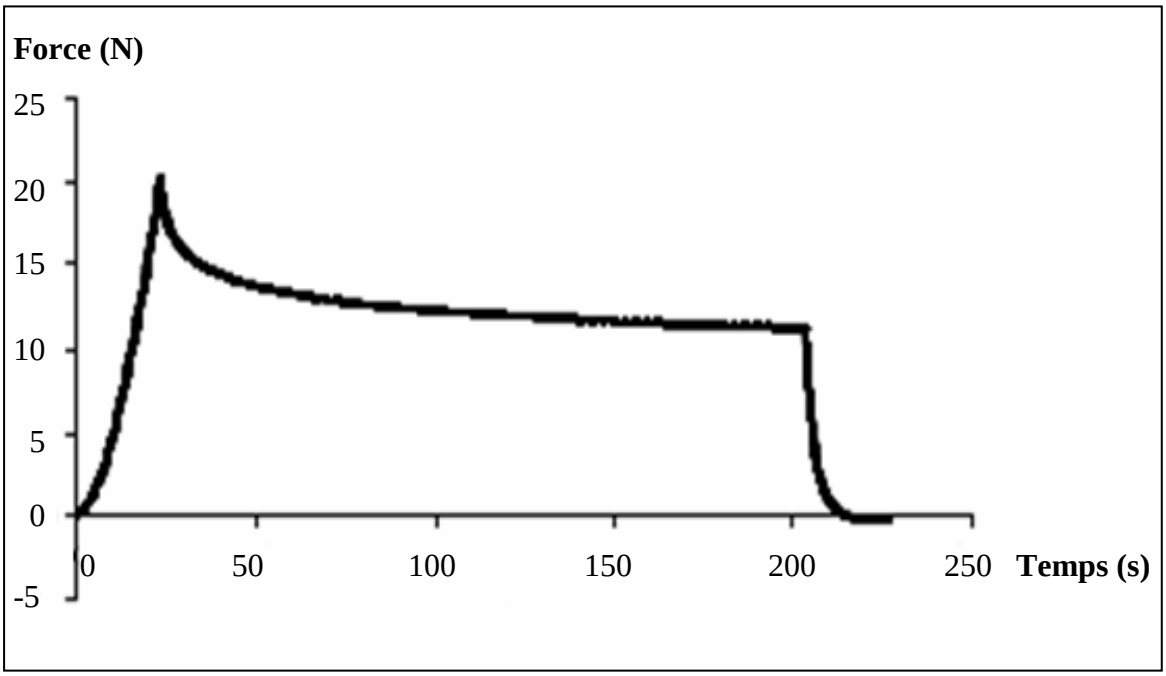


Figure 62. La Force (F) en fonction du temps de compression (s) sur les mies de pain

VII.1.3. Expression des résultats

Les tests de cuisson ont permis la caractérisation des pains par la mesure des volumes spécifiques des pains exprimés en cm^3/g.

VII.2. Propriétés mécaniques de la mie par le test de compression/relaxation au TA.XT2i

VII.2. 1. Principe

Le test consiste à comprimer un échantillon de mie sous forme géométrique connue, (cylindre dans notre cas) et à mesurer la force de résistance de l'appareil. La déformation de l'échantillon se fait à vitesse constante de compression.

VII.2.2. Mode opératoire

Le même protocole de caractérisation des propriétés mécaniques des mies fait par LASSOUED 2005 sur des pâte à pains à base de blé tendre a été suivi pour l'étude des propriétés mécaniques des mies au TA-XT2*i*

On laisse ressuyer pendant 2 heures à 25°C des pains cuits puis on les laisse au repos 24 h sous emballage étanche. Un cylindre de mie de 50 mm de diamètre et 30 mm d'épaisseur sont prélevés avec un emporte pièce au centre d'un parallélépipède de pain dans le sens de la levée au four. L'opération se fait sur trois pains appartenant à la même fournée. Les échantillons de mies sont comprimés avec une machine de traction /compression (TA.XT2i-Stable Micro System-GB) (Figure 61), à une vitesse de 20 mm/min jusqu'à une déformation de 66 p soit une distance de 20 mm environ. Durant la mesure, en haut de la sonde on fixe un poids de 5kg.

Pendant la mesure, le reste des échantillons est placé dans une boite en plastique fermée afin de limiter leur déshydratation. Les essais sont menés à température ambiante.

VII.2.3. Expression des résultats

Le module de Young apparent (E_{app}) est considéré comme un bon paramètre de caractérisation des propriétés mécaniques des mies (LASSOUED 2005). Ce dernier donné en Pa est déterminé graphiquement à partir de la pente à l'origine de la courbe donnant la Force (F) en N en fonction de la distance de compression (d) en mm (Figure 62), multipliée par le

rapport de la hauteur initiale d'un disque de mie (H'_0) sur leur surface (A'), en accord avec l'équation :

$$E_{app}\ (Pa) = \left(\frac{F_0}{d} \times \frac{H'_0}{A'} \right)$$

Où : $H'_0 = 30 \times 10^{-3}$ m, $A = \pi \times r^2 = 3{,}14 \times (25 \times 10^{-3})^2 = 2 \times 10^{-3}$ m^2

Cette équation devient alors :

$$E_{app}\ (Pa) = (Pente \times 2)$$

VII.3. Analyse de la texture de la mie

VII.3.1.Principe de la morphologie mathématique

L'évaluation de la structure alvéolaire des produits de panification met en jeux un certain nombre de critères tels que la taille, la forme des alvéoles ainsi que l'épaisseur de leurs parois (KAMMAN 1970). L'évaluation visuelle pour décrire les variations observées à l'œil (texture fine, grossière, lisse, granuleuse, homogène, irrégulière…) par des expert à longtemps été utilisé pour cette fin mai reste cependant qualitative et subjective (SCANLON et ZGHAL 2001). Par ailleurs, la quantification de la distribution spatiale des observations visuelles est possible par "*l'analyse de la texture*" (LASSOUED 2005 ; DEVAUX *et al.* 2005). Dans cette étude, la méthode employée pour extraire les données de texture est la morphologie mathématique.

D'après DEVAUX *et al.* 2005, le principe de la morphologie mathématique consiste à comparer chaque portion d'image à un masque de taille et de forme donnée, appelé "élément structurant" sur l'ensemble d'une image, ce qui entraîne sa transformation irréversible selon le niveau de gris de ses pixels. LASSOUED 2005, rappelle que par convention, un élément structurant carré de (2n+1) pixels de côté est dit de taille n. Sa taille est souvent définie par le nombre de pixels entourant le pixel central. L'élément structurant est successivement déplacé sur toute l'image. Pour chaque position, le niveau de gris du pixel central est modifié en fonction des niveaux de gris de ses voisins recouverts par l'élément structurant. La taille de ce dernier est de 1 pour un carré de 3×3 pixels, de 2 pour un carré de 5×5 pixels, etc. Deux opérations de base qui sont l'érosion et la dilatation sont alors appliquées sur les images. Dans le cas de l'érosion, le pixel central prend la valeur minimale en niveau de gris observée sur la

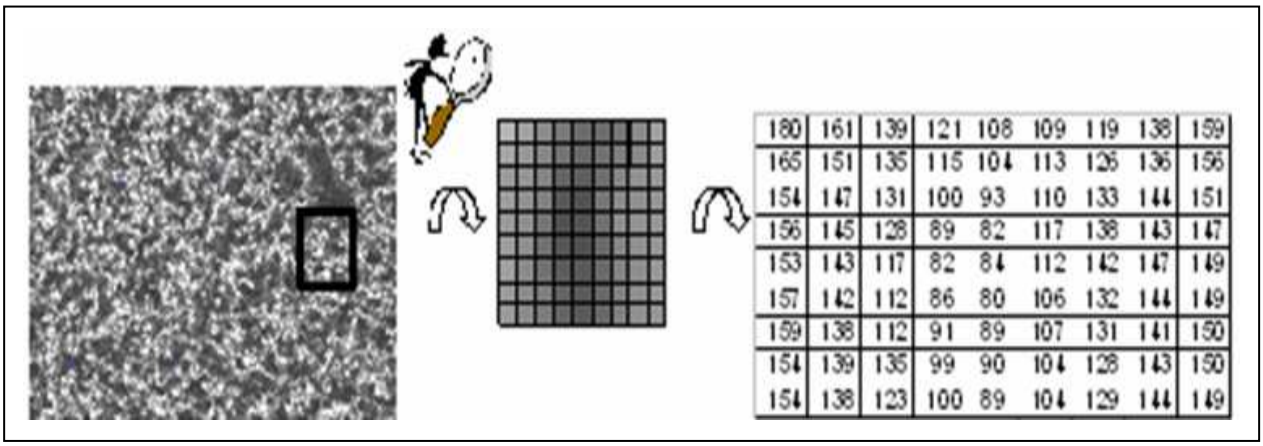


Figure 63. Principe de codage des intensités des niveaux de gris d'une image monochrome sous la forme d'un tableau chiffré (LASSOUED 2005).

zone recouverte par l'élément structurant et dans l'opération duale, la dilatation, on lui attribue la valeur maximale (SOILLE 2003 ; DEVAUX *et al.* 2005). En effet, les alvéoles disparaissent au fur et à mesure de l'augmentation de la taille des dilatations. La taille de l'élément structurant pour laquelle les alvéoles disparaissent donne une idée sur leurs dimensions.

VII.3.2. Mode opératoire

Pour la préparation des échantillons, les mêmes étapes citées par LASSOUED 2005 ont été suivie. Après un ressuage de 24 h des pains, des tranches d'épaisseurs équivalentes (~ 1mm) sont découpées au centre du produit. La prise d'image se fait par un scanner de type (Agfa SNAP Scan 1236). Les tranches de pain sont placées au centre du scanner et sont recouvertes d'une boite noire afin d'optimiser le contraste entre le fond noir et les tranches claires. Les images sont prises avec une résolution de 600 dpi. Elles sont enregistrées en format TIFF non compressé. Le traitement d'image se fait par le logiciel *Image Pro Plus*.

VII.3.3. Expression et classement des résultats

Le traitement des images des tranches de pain comporte les étapes suivantes :
Les images prises initialement en couleur sont converties en niveaux de gris "échelle 8". Chaque image est codée sous forme d'un tableau de chiffres correspondant aux niveaux de gris des pixels qui la constituent (Figure 63). Une image pixélisée est constituée de petits éléments de forme carrée appelés pixels. Dans le cas des images monochromes, chacun des pixels possède sa propre teinte de niveau de gris qui sera codée informatiquement. Un exemple de distribution des niveaux de gris d'une image est donné sur la figure 64 ;

- Comme le fond est nettement plus sombre que la mie, un seuil de niveau de gris permet d'isoler un masque de la tranche. Dans le cas de ces images monochromes, il existe 256 niveaux de gris allant 0 (noir) à 255 (blanc). L'œil nu de l'être humain n'est capable de détecter que 16 niveaux de gris uniquement. Chacun des pixels constitutifs de toute image monochrome possède sa propre teinte et est codé. On obtient en conséquence un tableau de chiffres correspondant au niveaux de gris des pixels la constituant (Figure 63).

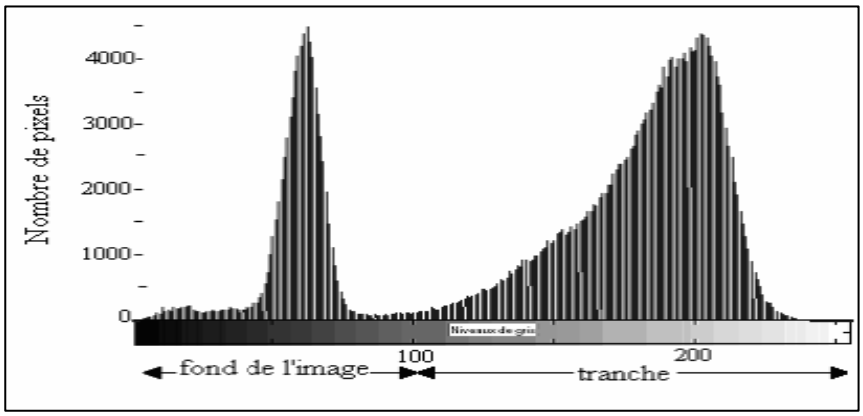


Figure 64. Histogramme des niveaux de gris d'une tranche de pain scannée après conversion de l'image couleur en niveaux de gris (LASSOUED 2005).

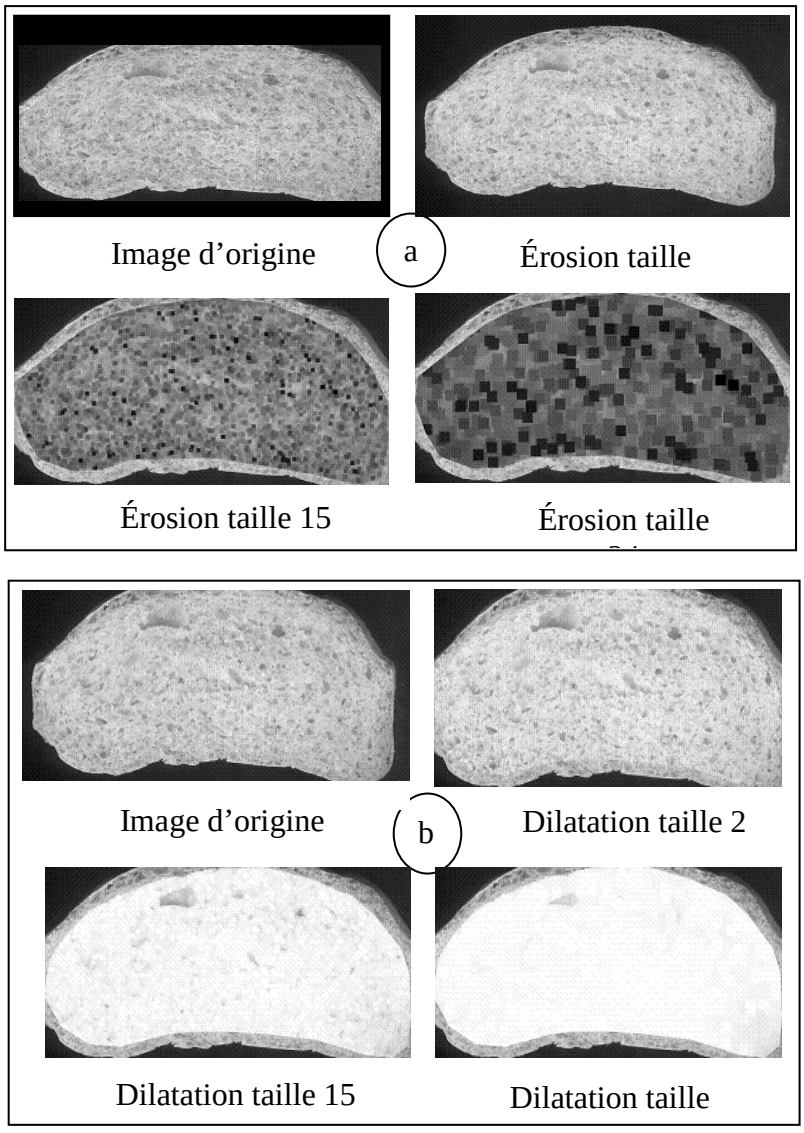


Figure 65. Exemple d'application d'étapes successives (a) d'érosion et (b) de dilatation de taille 2, 15 et 24 sur la région d'intérêt (le masque).

- L'histogramme représentant la distribution des niveaux de gris (Figure 64) montre deux pics. Le premier correspond aux pixels sombres du fond de l'image et le second aux pixels de notre échantillon, la tranche de pain. La superposition des histogrammes des niveaux de gris des images permet de vérifier que celles-ci sont prises dans les mêmes conditions ;

- Elimination du fond de l'image par seuillage. Cette étape consiste à superposer les histogrammes des niveaux de gris de nos échantillons afin de déterminer un seuil unique, pour l'ensemble des images. L'opération de seuillage revient à relever la résolution des images en pixels/millimètres.

- Délimitation de la région d'intérêt qui est la mie par élimination de l'épaisseur de la croûte. L'érosion ou la dilatation de cet objet permettra de définir le masque de la région d'intérêt qui correspond à la tranche de pain sans croûte. C'est ce masque qui sera utilisé pour l'analyse de la texture ;

- *n* étapes d'érosions sont appliquées à cette zone d'image. Le niveau de gris total diminue après l'application de chaque étape d'érosion. (Figure 65) et les parois des alvéoles se modifient. Pareillement, n étapes de dilatations sont appliquées à la même région d'intérêt. Ces opérations (Figure 65) modifient les alvéoles de la mie suite à l'augmentant du niveau de gris total de l'image. Le nombre *n* d'étapes d'érosions et de dilatations est choisi en fonction de la texture des pains et de la résolution de l'image. En général, il correspond aux dilatations et aux érosions nécessaires pour la disparition complète de la texture ou d'objets dans l'image.

D'après DEVEAUX *et al.* 2005, il est possible de déduire des informations quantitatives sur la texture des images de mies (de type granulométrique) à partir de l'évolution de la somme des niveaux de gris à chaque étape d'érosion et de dilatation. La somme des niveaux de gris à chaque $i^{ème}$ étape de transformation correspond au volume de l'image *Vi*. Ce volume est fonction de la présence d'objets sombres (alvéoles) et clairs (parois) de l'image. L'évolution de *Vi* (Figure 66) est fonction du nombre d'objets, de leurs dimensions et aussi de leur niveau de gris. C'est donc simultanément une caractéristique des distributions de taille et des niveaux de gris des objets d'une image. Toutefois, elle ne permet pas d'obtenir des informations directes sur le nombre d'objets car il n'y a pas de proportionnalité entre la variation des niveaux de gris d'une étape à une autre et le nombre

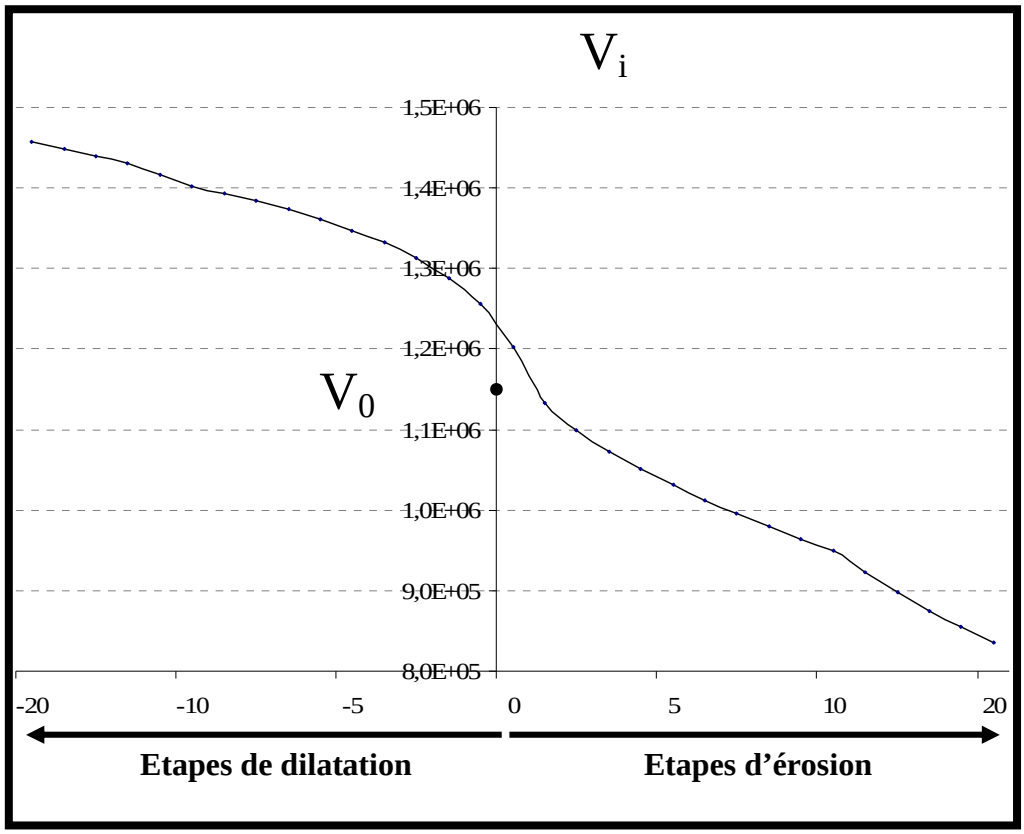


Figure 66. Courbe de décroissance de la somme des niveaux de gris selon les étapes de Dilatation et d'Erosions

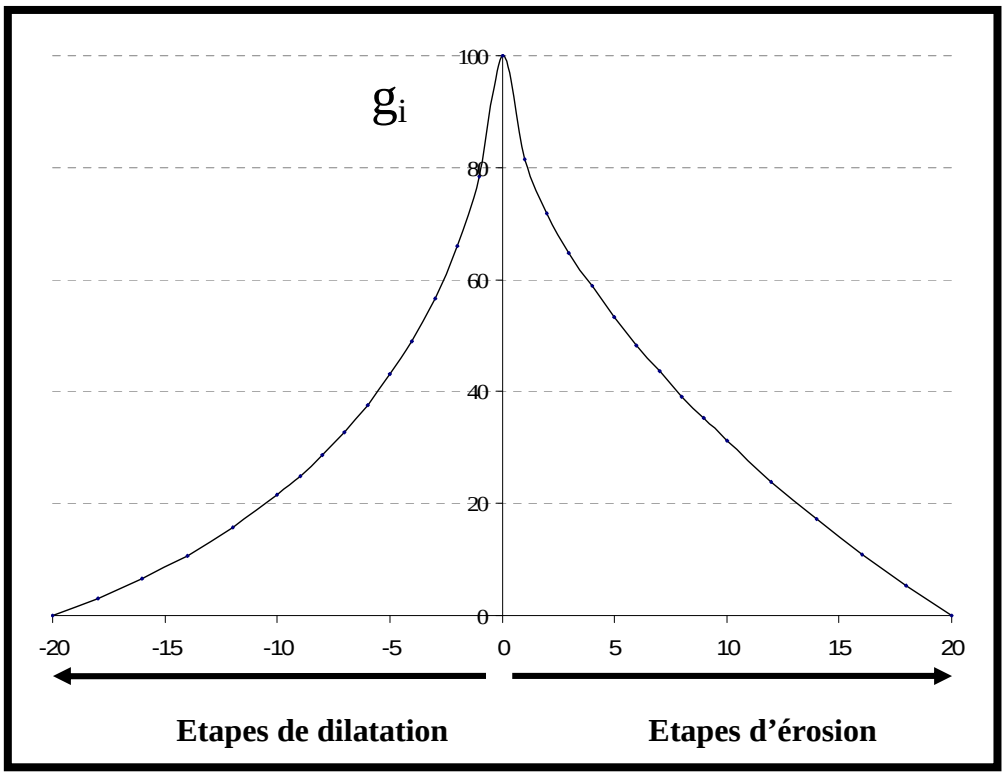


Figure 67. Courbe de texture granulométrique en niveaux de gris

d'objets concernés. En effet, ces derniers n'ont pas tous le même niveau de gris. La comparaison des courbes de texture de l'ensemble des images de mies scannées nécessite une étape de normalisation. Chacune des courbes dépend de la taille de la région d'intérêt considérée ainsi que de la somme des niveaux de gris initiale correspondante (Figure 66).

La normalisation de chacune des deux parties de la courbe associées respectivement aux n étapes d'érosion et aux n étapes de dilatation est effectuée selon la formule :

$$g_i = \frac{V_i - V_f}{V_0 - V_f} \times 100$$

Où : V_0 : Volume (somme des niveaux de gris) de l'image initiale ; V_f :Volume de l'image à la $n^{ème}$ étape d'érosion ou de dilatation ; V_i : Volume de l'image à la $i^{ème}$ étape d'érosion ou de dilatation ; gi : Volume normé de l'image à la $i^{ème}$ étape d'érosion ou de dilatation.

La courbe de texture granulométrique normalisée (évolution de gi en fonction des n étapes d'érosion et de dilatation) exprime en pourcentage relatif les variations d'intensité observées entre l'image initiale et la $n^{ème}$ étape de transformation (Figure 67). La partie gauche de cette courbe correspond à l'analyse des alvéoles et la partie de droite à celle de la mie.

Il est possible de classer les courbes de texture granulométrique des niveaux de gris par l'Analyse en Composantes Principales (ACP) selon l'équation 32 (SCHWARTZ 1993 ; DANZART 1998).

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^{p} XikUkj$$

Où *xik* : la valeur de la $k^{ième}$ variable observée pour l'individu *i* ; *ukj* : la valeur du poids de la variable *k* dans la composante principale *j* ; *cij* : la valeur de la composante principale *j* pour le $i^{ème}$ individu

VIII. CARACTERISATION SENSORIELLE DES PAINS

L'appréciation sensorielle des pains fabriqués est faite par un test de classement par rang "*test de FRIEDMAN "* (ANONYME 1995). Cet essai consiste à présenter à un jury de 10 dégustateurs une tranche de chacun des 5 pains à tester correspondant aux meilleures recettes comparées au témoin de blé tendre (Tableau 25).

Tableau 25. Pains choisis pour le test de classification par rang de Friedman

	HPMC (g pour 100 g de formule)	Hydratation (g pour 100 g de formule)
Farine de blé tendre		
Couple 02	0,82	92,80
Couple 03	1,93	92,70
Couple 04	2,78	93,18
Couple 06	3,315	90,47

Les échantillons sont codés A, B, C, D et E, incluant le pain témoin. Les dégustateurs ont à les classer en ordre croissant d'intensité de 1 à 10 selon les descripteurs suivants qu'on résume dans le Tableau 26.

Pour chaque descripteur, la comparaison globale des échantillons testés est réalisée avec le calcul de la statistique "*F*" *de Friedman*

$$F = 12/(JP\,(P+1)(\,R_1^2+ R_2^2+\ldots\ R_p^2)-3J(P+1)$$

Où : J : nombre de testeurs; P : nombre d'échantillons ; ($R_1^2+\ R_2^2+..R_p^2$) : somme des rangs attribués aux *P* échantillons et aux *J* testeurs.

Tableau 26. Descripteurs sensoriels décrivant la texture et l'aspect général des pains sans gluten (GAMBARO *et al.* 2002) retenus pour le test de *Friedman*

Sensation	Descripteur	Définition
Visuelle	*Couleur des pains***	- Classement des pains du foncé au clair
	Sècheresse visuelle	- Aspect de la surface du pain
Tactile	*Douceur*	- Sensation perçue au toucher de la mie. Le contraire de la rugosité
	Fermeté	- La force nécessaire à la réduction de la mie, par compression avec un seul doigt, à une surface plate
	Effritement	- Evaluation de la quantité de miettes obtenues après frottement d'une moitié de tranche de mie 3 fois de haut en bas avec son index
	Cohésion	- Facilité de former une boule de mie en 5s avec un morceau du centre de la mie
En bouche	*Fermeté*	- Force nécessaire pour mordre un morceau du centre de la mie avec ses dents de devant
	Viscosité	- Force nécessaire pour enlever le matériau des dents avec la langue
	Machâbilité	- Le nombre de mâches nécessaires pour avaler ¼ de tranche de mie sans croûte
Olfactive	*Odeur***	- Evaluation de présence d'une odeur non spécifique au pain en fonction de son intensité

**Nos descripteurs. Le reste des descripteurs sont cités par GAMBARO *et al.* 2002

IX. ANALYSE STATISTIQUE

Concernant les résultats de cette partie, l'analyse statistique est effectuée par StatView 5ème version, (Abacus Concepts ™, Berkeley,USA) et par XLSTAT (version 7.5.2.). La comparaison entre plusieurs moyennes est effectuée par l'analyse de la variance (ANOVA) à un facteur. Le test de Tukey/Kramer ou de Buferroni/Dunn sont utilisés pour la comparaison entre les groupes individuels de moyennes. La comparaison entre deux pourcentages à faibles effectifs présentés dans ce travail est réalisée par le test du Khi-Deux. La comparaison entre les variables expliquées et une ou plusieurs variables explicatives est obtenu par le calcul de régressions linéaires simples (SCHWARTZ 1993).

Pour le plan d'expérience construit, l'erreur expérimentale connue sous le nom "*d'erreur pure"*, est estimée à travers les points centraux du plan d'expérience. Pour toutes les réponses étudiées, le nombre de ddl est de 7 pour l'erreur totale, de 4 pour la somme des écarts due à la perte d'ajustement et de 3 pour la somme des écarts de l'erreur pure. Un χ^2 d'ajustement est alors calculé par l'estimation de la statistique *F* de Fischer Snedecor. Cette dernière est obtenue par le rapport de la différence des écarts moyens de la variation de perte d'ajustement sur l'erreur pure. Lorsque la variance d'ajustement est négligeable devant la variance de l'erreur expérimentale, le modèle est considéré comme bien ajusté (GOUPY 1999).

L'exploitation des courbes de texture granulométrique des niveaux de gris des pain a été faite par une technique d'analyse multidimensionnelle l'Analyse en Composante Principales (ACP). Cette méthode permet de décrire les informations contenues dans le tableau des données par la prise en considération des corrélations existantes entre les données. Nos individus correspondent aux courbes de diminution des niveaux de gris et nos variables aux étapes de transformation (érosion-dilatation). L'opération de centrage des données est obtenue par la soustraction de l'individu moyen aux autres individus. Les composantes principales correspondant aux combinaisons linéaires des variables à l'origine sont classées par ordre décroissant par le pourcentage de la variance initiale qu'ils expliquent. Les courbes des cartes de ressemblance sont dessinées à partir des valeurs des composantes deux à deux. Sur ces courbes, des vecteurs appropriés permettent l'interprétation de la composante principale en accord avec les variations observées sur toutes les courbes (FOUCART 1982 ; SCHWARTZ 1993 ; DANZART 1998). Dans cette étude, le niveau de significativité est fixé à 0,05).

RESULTATS & DISCUSSION
Partie 4

I- CHOIX DE LA FORMULE A TESTER EN PANIFICATION PAR L'ALVEOGRAPHE CHOPIN

Dans ce travail, le choix de la légumineuse à utiliser dans la formule 2/1 riz-légumes secs devant être testée en panification s'est fait par des essais à l'Alvéographe Chopin.

Les caractéristiques alvéographiques moyennes des farines témoin de blé tendre, de matières premières exemptes de gluten et des formules sans améliorant (FRF, FRP et FRC) sont regroupées dans le tableau 27.

Tableau 27. Caractéristiques alvéographiques des farines de blé tendre, de matières premières et formules exemptes de gluten

Farines	G (cm^3)	P/L	W (10^{-4}) J
Témoin :			
Blé tendre (*Kenza*)	17,8 ± 0,02	1,21 ± 0,01	180 ± 0,03
Ingrédients sans gluten :			
Riz	4 ± 0,01	0,009 ± 0,02	2,55 ± 0,02
Fèverole	6 ± 0,01	3,76± 0,01	19,58 ± 0,03
Pois protéagineux	8 ± 0,02	3,02 ± 0,02	14 ± 0,02
Pois chiche	8 ± 0,03	0,73 ± 0,02	4,23 ± 0,02
Formules sans gluten :			
FRF	8 ± 0,01	1,5 ± 0,04	13,8 ± 0,01
FRC	8 ± 0,04	0,2 ± 0,01	5,3 ± 0,07
FRP	7,5 ± 0,07	1,59 ± 0,04	10,4 ± 0,01

G : Gonflement (cm^3), P/L : Rapport de configuration, W (10^{-4}) : Travail de déformation (J).

Les caractéristiques rhéologiques des ingrédients sans gluten (riz et légumes secs), sont pour le gonflement (G) et le travail de déformation (W), inférieures à celles du témoin de blé tendre et aux normes algériennes de panification données par J.O.R.A. 1991 : (W) entre (130 et 180) $\times 10^{-4}$ J et G > 20 cm^3, ainsi qu'aux normes françaises données par GUINET et GODON 1994 : (W) entre (200 et 250) $\times 10^{-4}$ J et (G) > 20 cm^3. Pour le rapport de configuration P/L, mis à part les pâtes de pois chiche dans le rapport se situe dans la limite supérieure des intervalles donnés par JORA 1991 (entre 0,45 et 0,65) ou par GUINET et

GODON 1994(entre 0,5 et 0,7), tous les autres rapports sont soit trop élevés renseignant sur la forte ténacité des pâtes, soit trop bas reflétant leur intense propriété d'extensibilité

En ce qui concerne les farines des légumineuses, ce sont les caractéristiques rhéologiques de la féverole qui donnent le travail de déformation le plus élevé ($W = (19,58\times10^{-4}) \pm 0,03$ J). Celui enregistré pour le riz reste cependant, le plus faible des ingrédients sans gluten ($W = 2,55(\times10^{-4}) \pm 0,02$ J). Le rapport de configuration P/L du pois chiche ($0,73 \pm 0,02$) est le plus bas des matériaux exempts de gluten étudiés et demeure celui qui se rapproche le plus des normes algériennes de panification (J.O.R.A. 1991) et françaises (GUINET et GODON 1994) avec des P/L respectifs de 0,45 à 0,65 et de 0,5 à 0,7.

Les caractéristiques rhéologiques données par l'alvéographe Chopin pour les trois formules sans gluten (FRF, FRC et FRP), montrent une globale amélioration des propriétés panifiables tout en restant en dessous des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et françaises (GUINET et GODON 1994). Parmi les formules étudiées, c'est la FRF qui présente le meilleur travail ($W = (13,8\times10^{-4}) \pm 0,01$) et rapport de configuration P/L ($1,5 \pm 0,04$). Ce dernier étant celui qui se rapproche le plus des normes algériennes (J.O.R.A. 1991) et françaises (GUINET et GODON 1994) avec respectivement de 0,45 à 0,65 et de 0,5 à 0,7. Le gonflement de cette formule reste parmi les meilleurs enregistrés ($8 \pm 0,01$ cm^3). Toute fois, toutes les formules restent impanifiables.

La farine témoin *Kenza* se caractérise par un travail de déformation (W) de 180 ($\times10^{-4}$) $\pm$ 0,03 J, ce qui la classe comme farine de bonne force boulangère selon les normes algériennes J.O.R.A. 1991 (W entre (130 et 180) $\times10^{-4}$ J). Son alvéogramme reste cependant légèrement déséquilibré avec un gonflement moyen relativement faible de $17,8 \pm 0,02$ cm^3 et un rapport de configuration P/L assez élevé de $1,21 \pm 0,01$ renseignant sur la ténacité élevée de cette farine (P/L entre 0,45 et 0,65 (J.O.R.A. 1991)). Ces résultats restent cependant en dehors des intervalles de valeurs données par GUINET et GODON 1994 en panification française (W entre (200 et 250) $\times10^{-4}$ J ; P/L entre 0,5 et 0,7 et G > 20 cm^3).

Les propriétés rhéologiques des légumineuses données par l'Alvéographe Chopin sont meilleures que celles du riz seul. Une amélioration des propriétés rhéologiques (W, P/L et G) est notée pour toutes les formules avec la FRF en tête du classement.

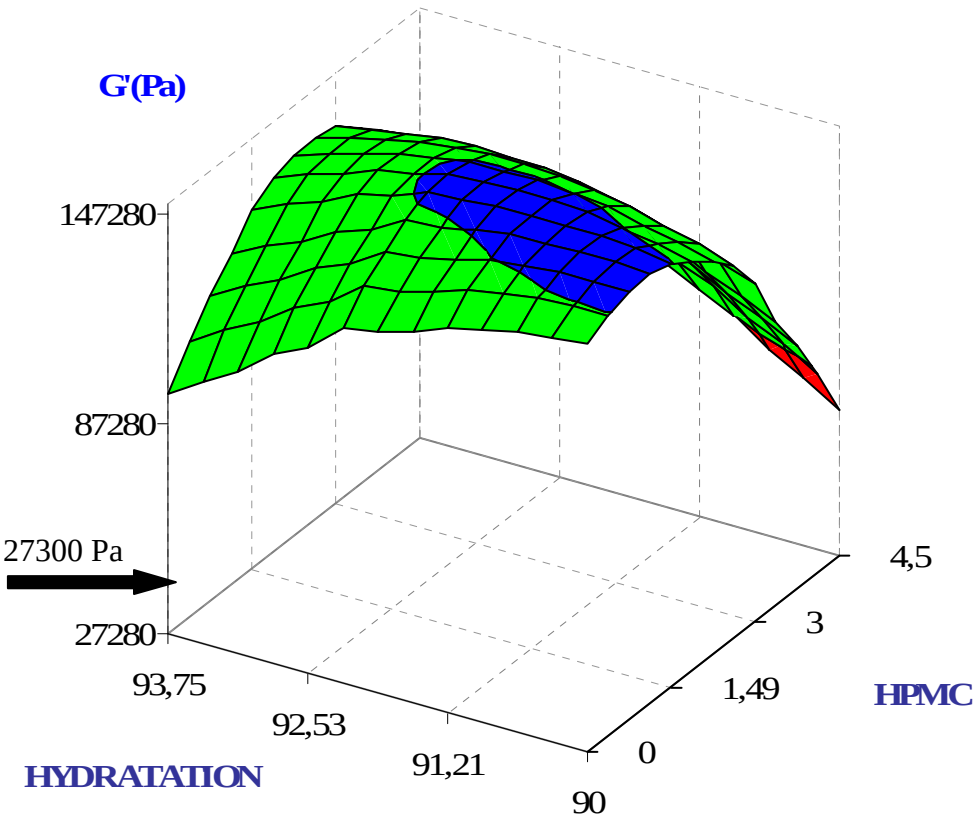


Figure 68. Surface de réponse du comportement élastique (G') des pâtes de la FRF. ➡: niveau du témoin égal à 27300 Pa

Les ingrédients exempts de gluten ainsi que les trois formules étudiées (FRF, FRP et FRC) demeurent inaptes à la panification. Pour le témoin de blé tendre "kenza", on peut déduire qu'il se prête bien à la panification malgré ses propriétés rhéologiques moyennes et reste meilleur que les formules sans gluten étudiées.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi de tester en panification uniquement la FRF vu les propriétés rhéologiques supérieures qu'elle a présenté par rapport aux autres formules. Par ailleurs, l'examen des autres formules en panification reste toujours intéressant à réaliser dans de futures investigations.

II. EXPLOITATION DES SURFACES DE REPONSES

II.1. Confirmation de l'ajustement du plan d'expérience

Le tableau 28 donne un résumé de l'analyse des variances pour les réponses : G', G", tan δ, IR et E_{app}. Ce test statistique montre que la variance d'ajustement est négligeable devant la variance de l'erreur expérimentale quelque soit la réponse étudiée, ce qui vérifie le bon ajustement de nos modèles.

Tableau 28 : Test d'analyse de la variance des paramètres de traçage des surfaces de réponses des pâtes de la formule Riz-Fèverole

Origine des variations	*Carrés moyens des écarts*				
	G'	***G''***	***tan δ***	***IR***	***E***
Manque d'ajustement	1,11 E9	14316679	0,015	0,034	0,127
Erreur pure	6,03 E8	8,1798 E8	0,009	0,053	0,017
F	***1,85*** ^{NS*}	***0,017*** ^{NS*}	***1,60*** ^{NS*}	***0,647*** ^{NS*}	***7,11*** ^{NS**}

F : variance de Fisher-Snedecor, *NS** : différence non significative (p >0.05), *NS*** : différence non significative (p >0,01)

II.2. Propriétés viscoélastiques des pâtes en fonction des niveaux "*HPMC-Eau*"

Les teneurs en eau et en HPMC étudiées montrent pour la formule RF les surfaces de réponses affichées en Figure 68.

La surface de réponse expérimentale du ***comportement élastique*** (Figure 68) indique que quelque soient les quantités d'HPMC et d'eau utilisées pour la formule RF, le module de

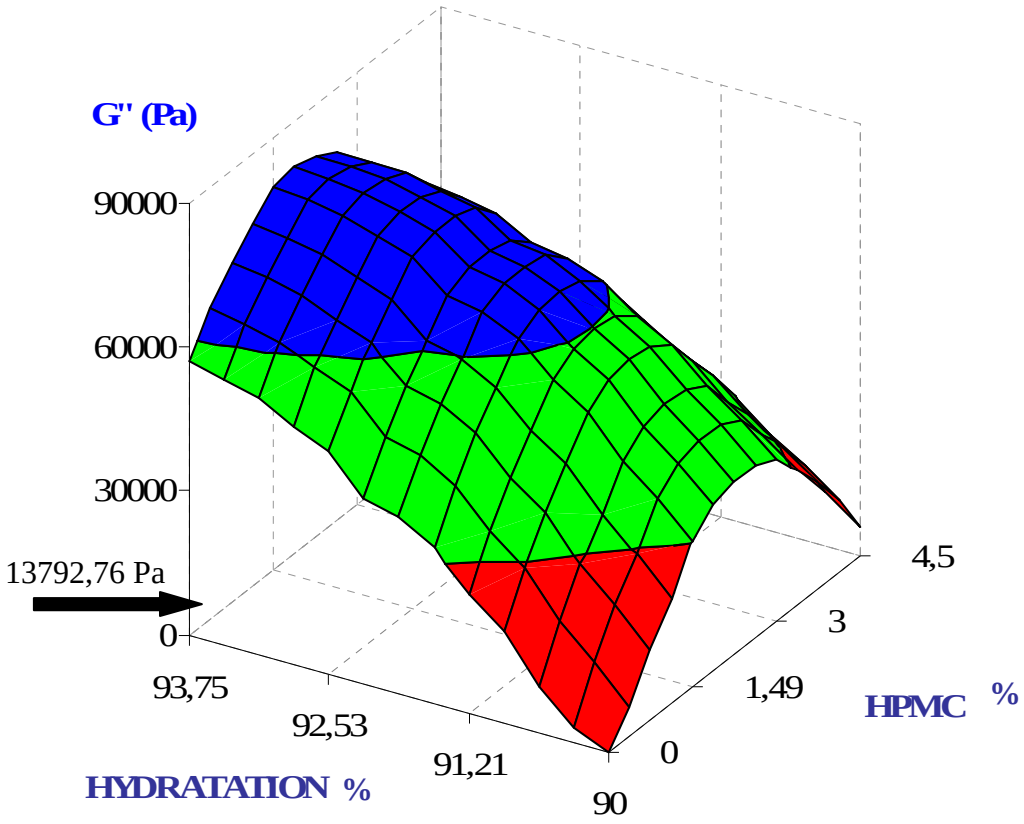


Figure 69. . Surface de réponse du comportement visqueux (G") des pâtes de la FRF. ➡: niveau du témoin égal à 13792.76 Pa.

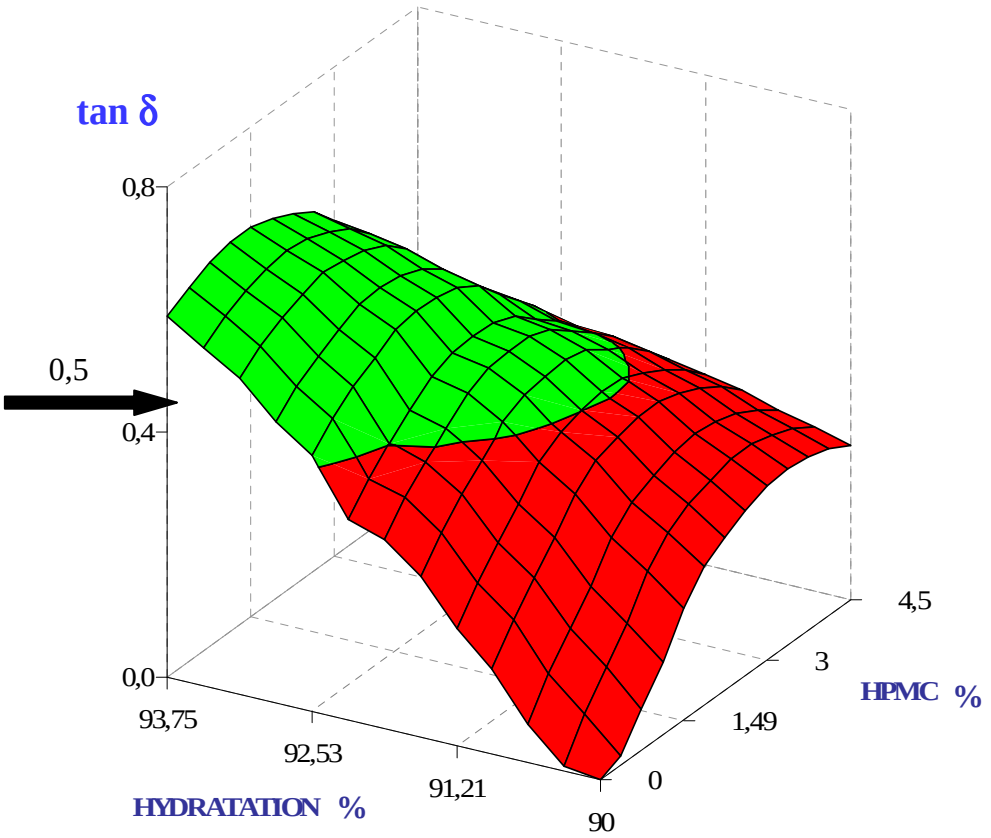


Figure 70. Surface de réponse du comportement élastique (tanδ) des pâtes de la FRF. ➡: niveau du témoin égal à 0,50 Pa.

stockage G′ [47000-145000 Pa] est nettement supérieur à celui du témoin (27300 Pa). Cette supériorité dans le caractère élastique est signalée dans les travaux de SIVARAMAKRISHNAN *et al*. (2004) pour des pâtes à base de riz avec ou sans adjonction d'HPMC. Selon ces auteurs, l'absence d'agents liants dans les pâtes sans gluten laisse se manifester des forces répulsives de type "amidon-amidon" ou "amidon-protéines" donnant des G′ élevés.

Le comportement visqueux représenté par le module de perte G" est exprimé par une surface de réponse (Figure 69) dont les niveaux [0-90000 Pa] encadrent le témoin (G" = 13792 Pa), avec une supériorité flagrante vers les taux d'hydratation les plus élevés de l'intervalle (> 90,6%). Quelque soit le taux d'hydratation, ce paramètre semble évoluer selon une allure en forme de cloche montrant un optimum (G" = 89600 Pa) autour de 2,6% d'HPMC. Le passage de 90 à 93% d'hydratation semble en général en faveur d'une accentuation du caractère visqueux de notre pâte RF qui s'éloigne du témoin à partir de 90,6% environ.

L'interprétation de ces deux caractères distinctement n'étant pas aisée à cause de l'interdépendance qui les relie, il est plus judicieux de considérer l'évolution de leur rapport G"/G′. Sachant que la pâte témoin de farine de blé se caractérise par un rapport viscosité/élasticité exprimé aussi par tan δ = G"/G′ de 0,5, avec un module élastique nettement plus bas que celui de notre étude. La zone de réponse la plus intéressante de G" pour notre formule est celle où le caractère visqueux dépasserait le témoin deux fois plus que ne l'a montré le caractère élastique G′. Cette zone semble se situer vers les fortes valeurs d'hydratation et l'optimum de taux d'HPMC.

La surface de réponse indiquant l'évolution de tan δ (Figure 70), montre une amélioration insuffisante du caractère visco-élastique quand le taux d'HPMC est augmenté aux faibles taux d'hydratation. Le rapprochement du témoin, cependant, ne semble assuré, que lorsque l'hydratation est suffisamment élevée soit au voisinage de 93% mais avec un taux d'HPMC limité à près de 3,5%.

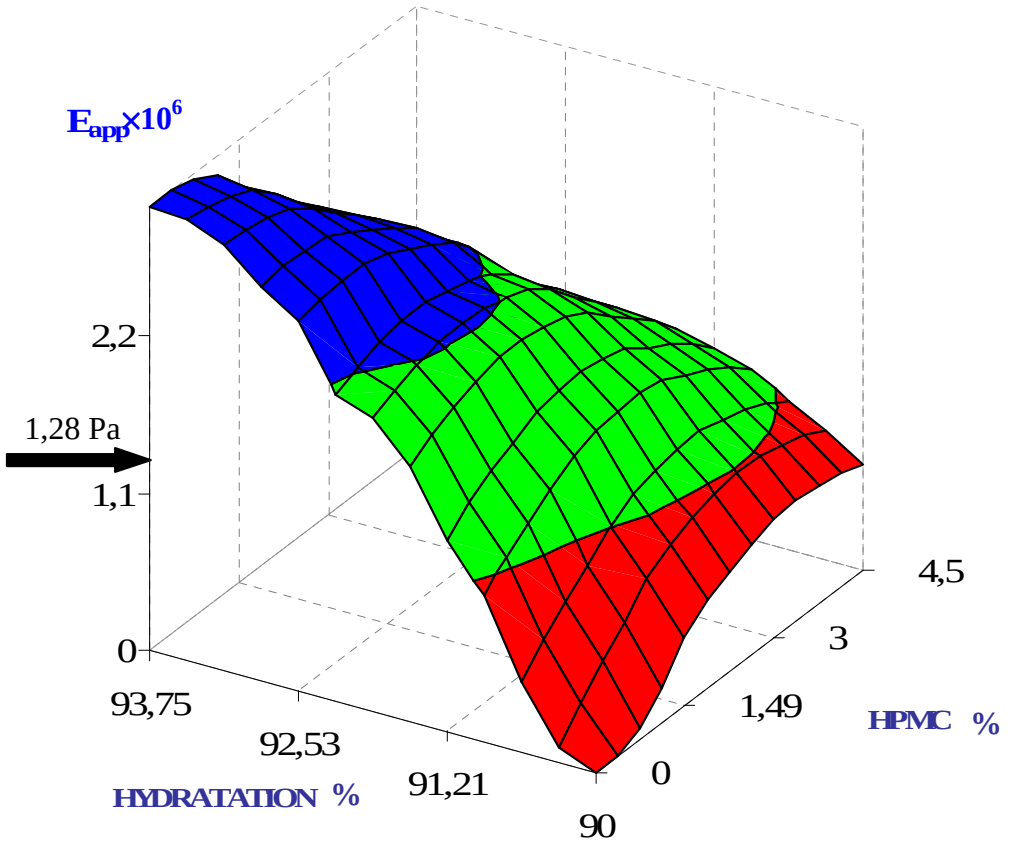


Figure 71. Surface de réponse des propriétés mécaniques à travers le module de Young apparent (E_{app}) des pâtes de la FRF. ➡ : niveau du témoin égal à $1,28\times10^6$ Pa.

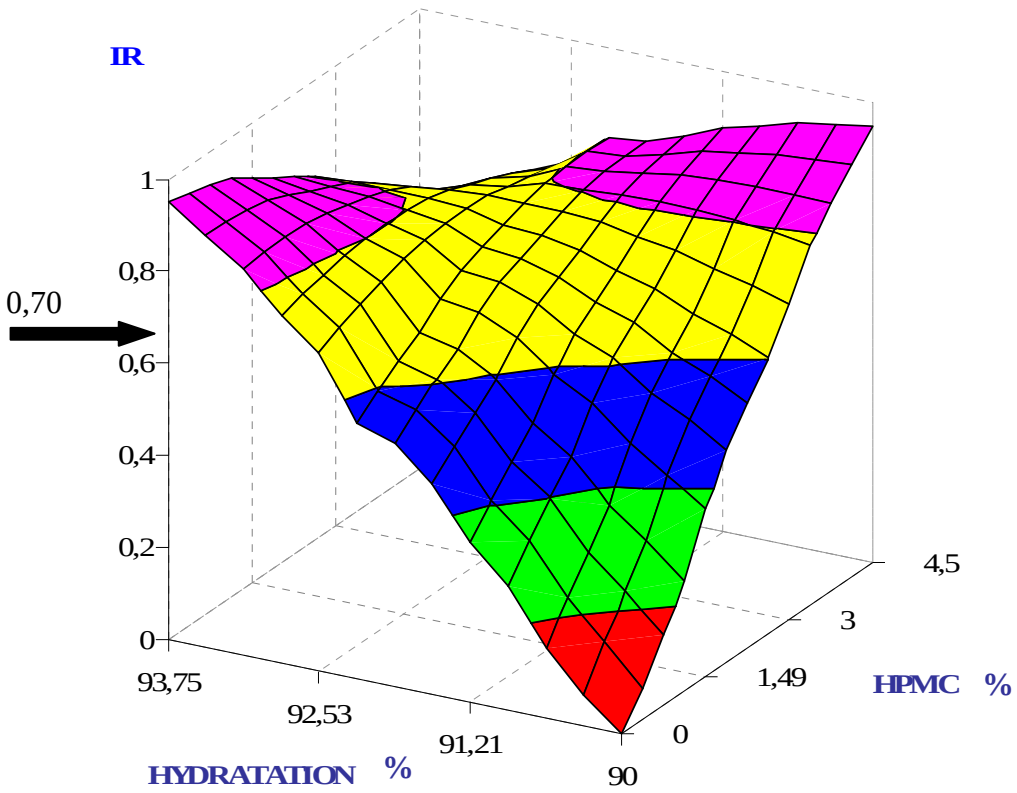


Figure 72. Surface de réponse des propriétés mécaniques à travers l'Indice de Relaxation (IR) des pâtes de la FRF. ➡ : niveau du témoin égal à 0,70 Pa.

Malgré l'éloignement important de G´par rapport au témoin, notre formule a pu se rapprocher en qualité par un rapport G"/G´confirmant que les deux caractères visqueux et élastique sont interdépendant et complémentaires. Il semble suffire donc d'avoir des pâtes dont le caractère élastique est deux fois plus intense que le caractère visqueux pour garantir des aptitudes d'expansion et de rétention gazeuse intéressantes. L'intersection de la surface de réponse de tan δ de notre formule avec le niveau du même paramètre caractérisant le témoin nous permet de déduire tous les couples de taux d'HPMC et d'hydratation garantissant une viscoélasticité convenable, identique à celle donnée par la farine de blé tendre (tan δ = 0,5).

II.3. Propriétés mécaniques des pâtes

Les réponses de la formule RF au test de compression sont exprimées par les niveaux de l'Indice de relaxation (IR) et du module de Young apparent (E_{app}), assurés par les deux intervalles d'HPMC et d'hydratation à étudier (Figures 71 et 72). Les surfaces de réponses correspondantes ont des niveaux IR [0-0.95] et E_{app} [0-3.2 N/mm], encadrant le témoin qui présente des niveaux respectifs de 0.50 et de 1.16 N/mm. L'IR varie de 0 à 0.95 en montrant un accroissement en général quand les niveaux d'HPMC et d'eau augmentent à près de 3.5% et 92.53% (zone I). A partir de cette limite, un déclin se manifeste en allant vers les valeurs élevées des deux variables. Ce déclin est représenté sur la figure 71 par le zone II du domaine vers les fortes valeurs HPMC-eau (>3.5% HPMC et >92.53% eau). Les pâtes appartenant à la zone II sont moins structurées que celles de la zone I. La surface de réponse du module de Young permet de distinguer là aussi deux zones. La zone I incluant le couple d'intervalles [0-3.5%] HPMC et [90-92.53%] eau, pour laquelle E_{app} augmente avec l'augmentation des deux variables et la zone II (>3.5 HPMC et >92.53% eau), où un déclin est exprimé.

L'étude des effets de l'eau d'hydratation et du taux d'HPMC sur les propriétés mécaniques des pâtes de la formule RF (Figure 71 et 72) montre que malgré la différence d'allure des surfaces de réponses de IR et du E_{app}, elles concluent à une proportionnalité entre l'hydratation et l'HPMC sauf pour couple d'intervalle "Hydratation-HPMC" : [92.53-93.75]% et [3.5-4.50]% où la relation devient inversement proportionnelle. Pour ces mêmes domaines d'HPMC-hydratation, on note également une diminution du caractère visqueux des pâtes (Figure 69), et du comportement visco-élastique par l'abaissement de tan δ (Figure 70).

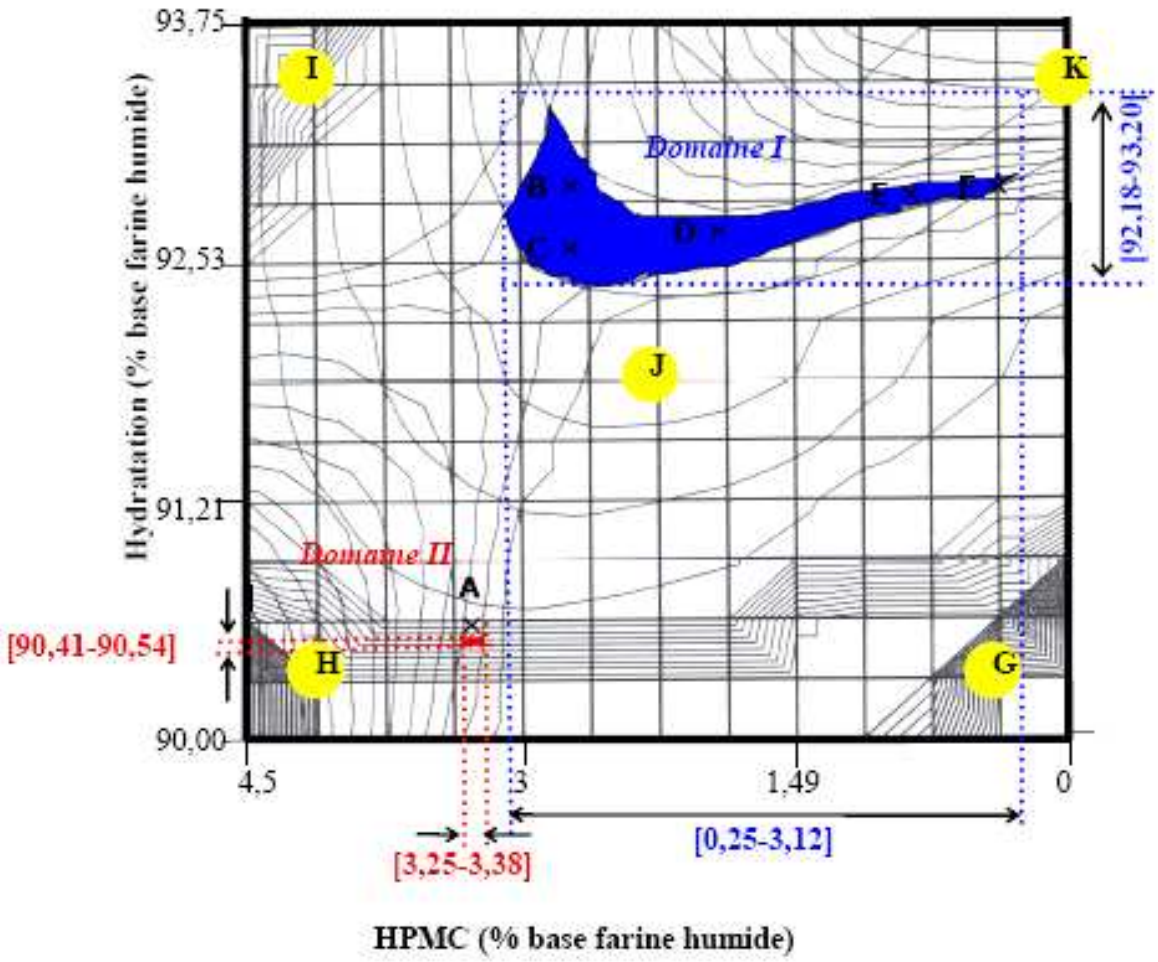


Figure 73. Délimitation des domaines optima HPMC-Eau des PSG de la formule RF par superposition des courbes de niveau des paramètres rhéologiques.

Légende :

- *Couples HPMC-Eau à l'intérieur des domaines optima :* **I** (A [3,32-90,50]), **II** (B [2,78-93,18], C [2,78-92,73], D [1,93-92,66], E [0,82-92,80]), F [0,33-92,85]
- *Couples de vérification hors domaines optima :* G [0,33-90,28], H [4,17-90,28], I [4,17-93,46], J [2,25-91,87], K [0-93,46].

II.4. Optimisation

Les domaines de composition HPMC-Eau permettant l'obtention des propriétés rhéologiques les plus proches de celles de pâtes de blé tendre sont dits "optima". Les domaines optima HPMC-Eau des PSG de la formule RF sont obtenus par la superposition des courbes de niveau des réponses des paramètres rhéologiques obtenues après coupure de chaque surface de réponse à son niveau de témoin correspondant sauf pour celle du module de stockage (G′ = 27300 Pa) qui en était supérieure (G" = 13792,76 Pa, tan δ = 0,50, E_{app} = 1,16×10^6 Pa, IR = 0.70). Cette superposition a permis de délimiter deux domaines des niveaux HPMC-Eau assurant des caractéristiques rhéologiques identiques à celle de la farine témoin (Figure 73) :

- ***Domaine I*** : [92,18-93,20] Eau et [0,25-3,12] HPMC,
- ***Domaine II*** : [90,41- 90,54] Eau et [3,25-3,38] HPMC.

La Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR) a largement été utilisée pour l'optimisation de pains sans gluten (COLLAR *et al.*1999 ; SANCHEZ, OSELLA and DE LA TORRE 2002 ; KOBYLAÑSKI, PÉREZ and PILOSOF 2004 ; McCARTHY *et al.* 2005). Par ailleurs, seuls YLIMAKI *et al.* 1988 ; METTLER and SEIBEL 1993) ont utilisé la MSR avec superposition des surfaces de réponses afin d'optimiser la combinaison de gommes et d'eau qui a remplacé avec succès le gluten dans la fabrication de pains sans gluten.

Pour les deux domaines optima obtenus, aucune intersection avec les modules de stockage (G′) ou de perte (G") n'est notée. Ils sont obtenus par le croisement respectif des courbes de niveau de "tan δ-IR" pour le premier domaine et de "E_{app}-IR" pour le second. Tous les points à l'intérieur de ces domaines sont supposés assurer des caractéristiques rhéologiques identiques à celle de la farine témoin

II.5. Validation des résultats de l'optimisation

En vue de valider l'ensemble des résultats d'optimisation obtenus par MSR, nous avons sélectionné dans un premier temps des couples HPMC-Hydratation à l'intérieur et en dehors des domaines optima (Tableau 29) puis nous avons vérifié quelques unes de leurs caractéristiques : cinétiques de fermentation, propriétés rhéologiques à l'Alvéographe Chopin

et propriétés viscoélastiques, imagerie par MBCL des pâtes ainsi que par des tests de panification. En complément à ceci, les pains obtenus ont été caractérisés par le suivi des cinétiques de perte d'eau et d'expansion au four, par l'étude des propriétés texturales des mies par analyse d'image et classification par ACP, par l'approche des propriétés mécaniques des mies et enfin, par caractérisation sensorielle.

Tableau 29. Couples HPMC-Hydratation représentatifs des domaines optima et hors domaines optima après optimisation par MSR de PSG de la FRF

	Couples HPMC-Hydratation
DANS LES DOMAINES OPTIMA ***:***	
Domaine I	**(B)** [2,78 - 93,18]
	(C) [2,78 - 92,73]
	(D) [1,93 - 92,66]
	(E) [0,82 - 92,80]
	(F) [0,33 - 92,85]
Domaine II	**(A)** [3,32 - 90,47]
HORS DOMAINES OPTIMA :	**(G)** [0,33-90,28]
	(H) [4,17 - 90,28]
	(I) [4,17 - 93,46]
	(J) [2,25 - 91,87]
	(K) [0 - 93,46]

II.5.1. cinétiques de fermentation

Le suivi des cinétiques de fermentation a été utilisé dans ce travail comme outil de validation des résultats d'optimisation en vue de la panification de la FRF approchés par MSR. Le suivi de l'expansion des pâtes testées a été effectué par deux méthodes. La première correspond à la technique conventionnelle au mesureur de pousse et la deuxième est une méthode que nous avons mis au point par lyophylisation des pâtons. Cette méthode permet non seulement le suivi des cinétiques de fermentation mais également d'observer l'évolution de la structure des pâtons au cours de cette étape. Les couples HPMC-Hydratation testés sont reportés dans le tableau 29.

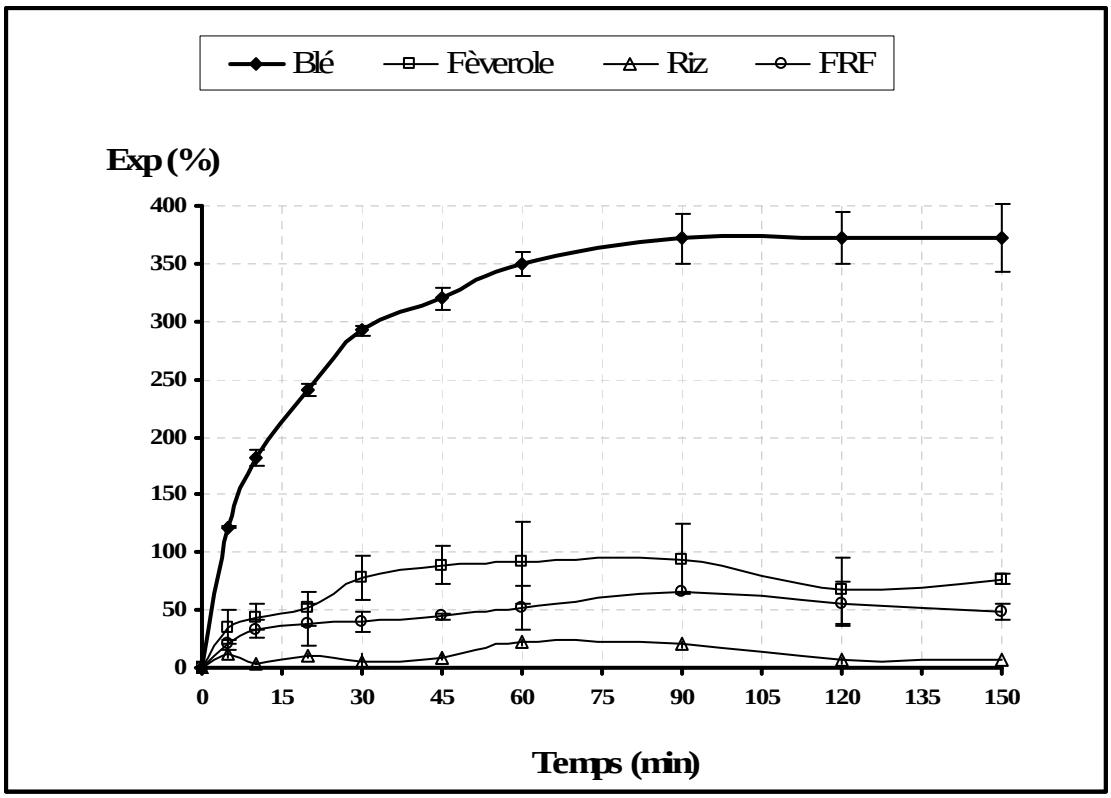


Figure 74. Suivi des cinétiques de fermentation par la technique de lyophilisation des pâtes de matières premières exemptes de gluten comparées au témoin de blé tendre. Exp : Expansion en %.

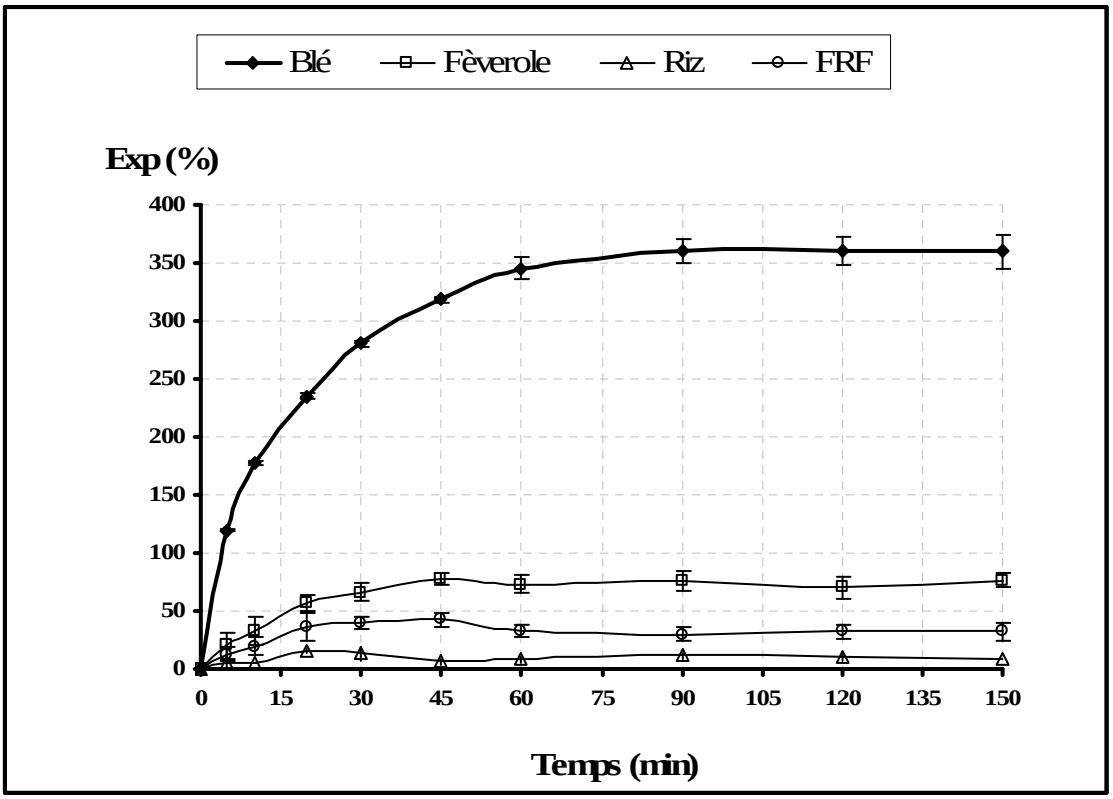


Figure 75. Suivi des cinétiques de fermentation au mesureur de pousse de matières premières exemptes de gluten comparées au témoin de blé tendre. Exp : Expansion en %.

Suivi des cinétiques de fermentation :

Les cinétiques de fermentation des matières premières exemptes de gluten (riz, fèverole), de la FRF ainsi que du témoin de blé tendre sont représentées sur la figure 74 pour le suivi sur des pâtes lyophylisées et sur la figure 75 pour le suivi au fermenteur de pousse.

La prise en considération des deux techniques de suivi des cinétiques de fermentation montre globalement une similitude dans les évolutions des taux d'expansions des pâtes concernées avec néanmoins des valeurs légèrement plus basses pour le suivi au fermenteur de pousse. Les pâtes du témoin de blé tendre s'expansent environ 5 fois plus que celles de la fèverole et 42 à 48 fois plus que celles du riz. Ces résultats renseignent sur la quasi nullité de rétention gazeuse des pâtes de riz contre une plus faible perméabilité au CO_2 pour les pâtes de fèverole. Ceci pourrait être attribué à la qualité (HUEBNER *et al*. 1990 ; CUQ et LEYNAUD-ROUAUD, 1992) et à la quantité de protéines des légumineuses intéréssantes par rapport à celles du riz. En effet, ELIAS 1995 signale l'importance de la quantité de protéines sur la qualité des produits finis mais à base de blé tendre. La FRF sans HPMC ajouté montre une amélioration du niveau d'expansion par rapport à la courbe du riz tout en restant inférieure à celle de la fèverole. Alors que la courbe de la cinétique de fermentation du riz présente une allure pratiquement plate, l'optimum de fermentation de la fèverole ainsi que de la FRF se situe à 45 min avec respectivement entre 78 et 89,16% et entre 42,29 et 44,2% en prenant en considération les deux techniques de fermentation. L'optimum de fermentation pour le témoin de blé tendre est de 90 min avec des expansions entre 360 et 372,41%. Ces résultats montrent la résistance du réseau de gluten à la pression du CO_2 dégagé au cours de la fermentation contre la difficulté à retenir ce gaz pour la fèverole et la FRF avec des temps optima plus faibles. Le niveau final d'expansion atteint entre 360 et 371,65% pour le témoin de blé tendre, 76,71 pour la fèverole et entre 32,1 et 48,3% pour la FRF.

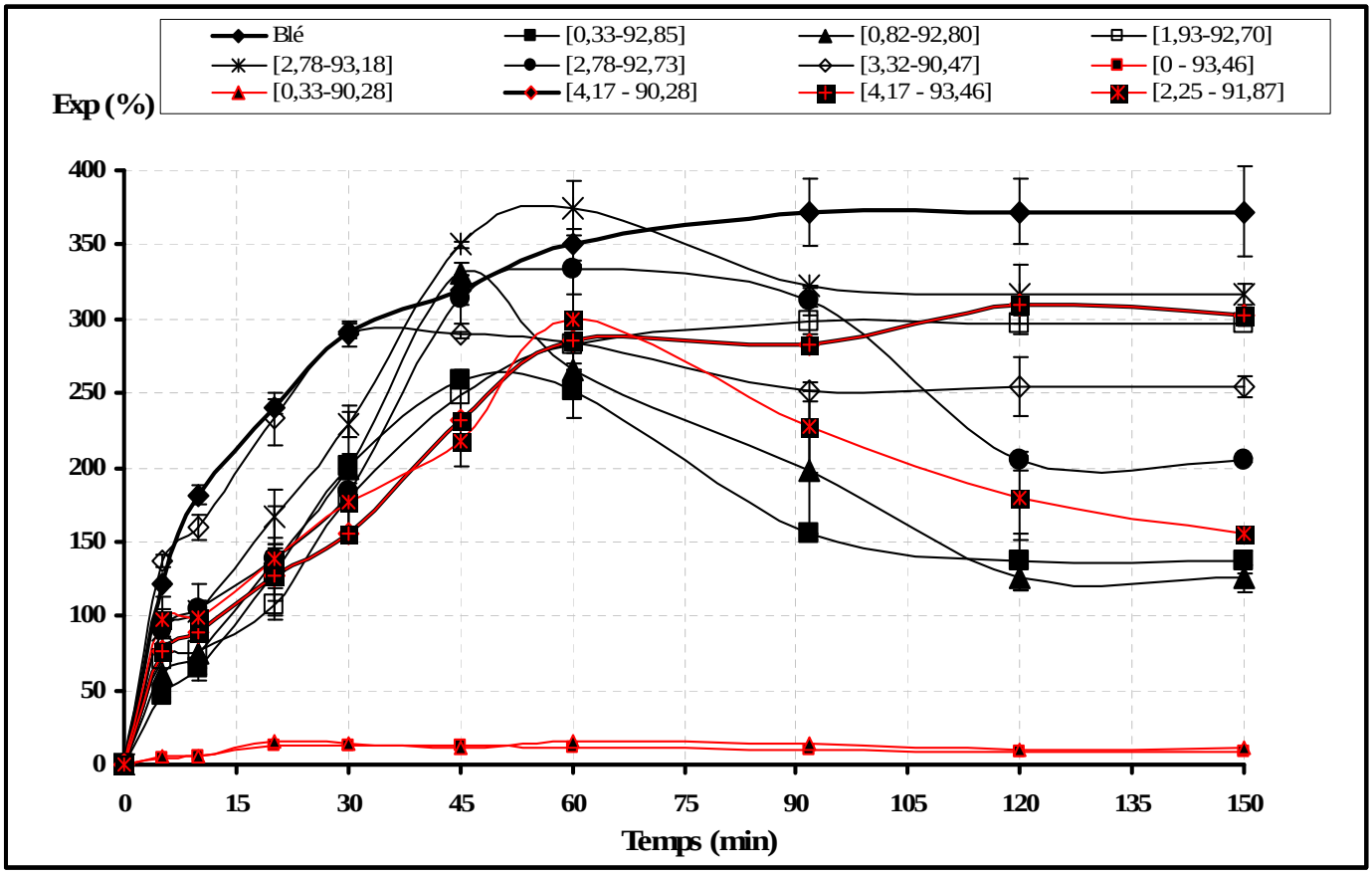


Figure 76. Suivi des cinétiques de fermentation par la technique de lyophilisation des pâtes des points de vérification par rapport au témoin de blé tendre. Exp % : Expansion en cm^3 pour 100 cm^3 de volume initial. Points hors domaines optima : ———

Le suivi des cinétiques de fermentation des couples HPMC-Hydratation utilisés pour tester la validité de la MSR (Tableau 29) est donné en figure 76.

De façon globale, toutes les pâtes correspondant aux couples HPMC-Hydratation (Hors ou dans les domaines optima), s'expansent moins que le témoin de blé tendre. Par ailleurs, les courbes des couples [0-93,46] et [0,33-90,28] (hors domaines optima), sont relativement plates témoignant de la forte perméabilité de leurs pâtes au CO_2 dégagé au cours de la fermentation. Pour les points à l'intérieur des domaines optima ([2,78-93,18], [2,78-92,73], [1,93-92,66], [0,82-92,80], [0,33-92,85] et [3,32-90,47]), l'optimum de fermentation est vers les 45 min. Pour les points hors domaines optima, les niveaux maximums de fermentation relevés sont aux alentours de 20 min pour les couples [0,33-90,28] et [0-93,46], et de 60 min pour le couple [2,25-91,87] et de 120 min pour les couples [4,17-90,28] et [4,17-93,46]. La recherche de corrélations entre les temps optima de fermentation et les taux d'HPMC montre une corrélation forte et positive entre ces paramètres (r = 0,99). Toutefois, tous ces optima d'expansion notés pour les couples HPMC-Hydratation demeurent plus faibles que ceux du témoin de blé tendre (90 min).

En conclusion l'absence de différences significatives entre la technique du suivi des cinétiques de fermentation par lyophilisation des pâtes et par la méthode conventionnelle au fermenteur de pousse est validé. Le riz présente les plus faibles taux d'expansion exprimant une perméabilité élevée de ses pâtes vis à vis du CO_2 dégagé au cours de la fermentation. Une amélioration du niveau d'expansion est notée pour la FRF tout en restant inférieur à celui des pâtes de fèverole. L'optimum de fermentation de la FRF et de la fèverole est de 45 min contre un temps deux fois plus long pour le témoin de blé tendre (90min) confirme la haute capacité à la rétention gazeuse de ce dernier. Pour les couples HPMC-Hydratation à l'intérieur des domaines optima, l'optimum de fermentation relevé se situe aux alentours de 45 min. Pour les points hors domaines optima, il est variable en fonction des points considérés. Les temps optima de fermentation sont proportionnels aux taux d'HPMC. Malgré que la présence d'HPMC dans les formules a permis d'améliorer la rétention gazeuse à l'intérieur des pâtes de la FRF, ces résultats ne sont qu'un indicateur et ne peuvent pas prédire seuls les meilleurs Vsp et textures des mies. Les tests de panification restent les meilleurs juges d'autant plus que l'HPMC est une gomme qui se caractérise par la formation d'un fort réseau à travers l'union de ces branchements mais sous l'effet des fortes

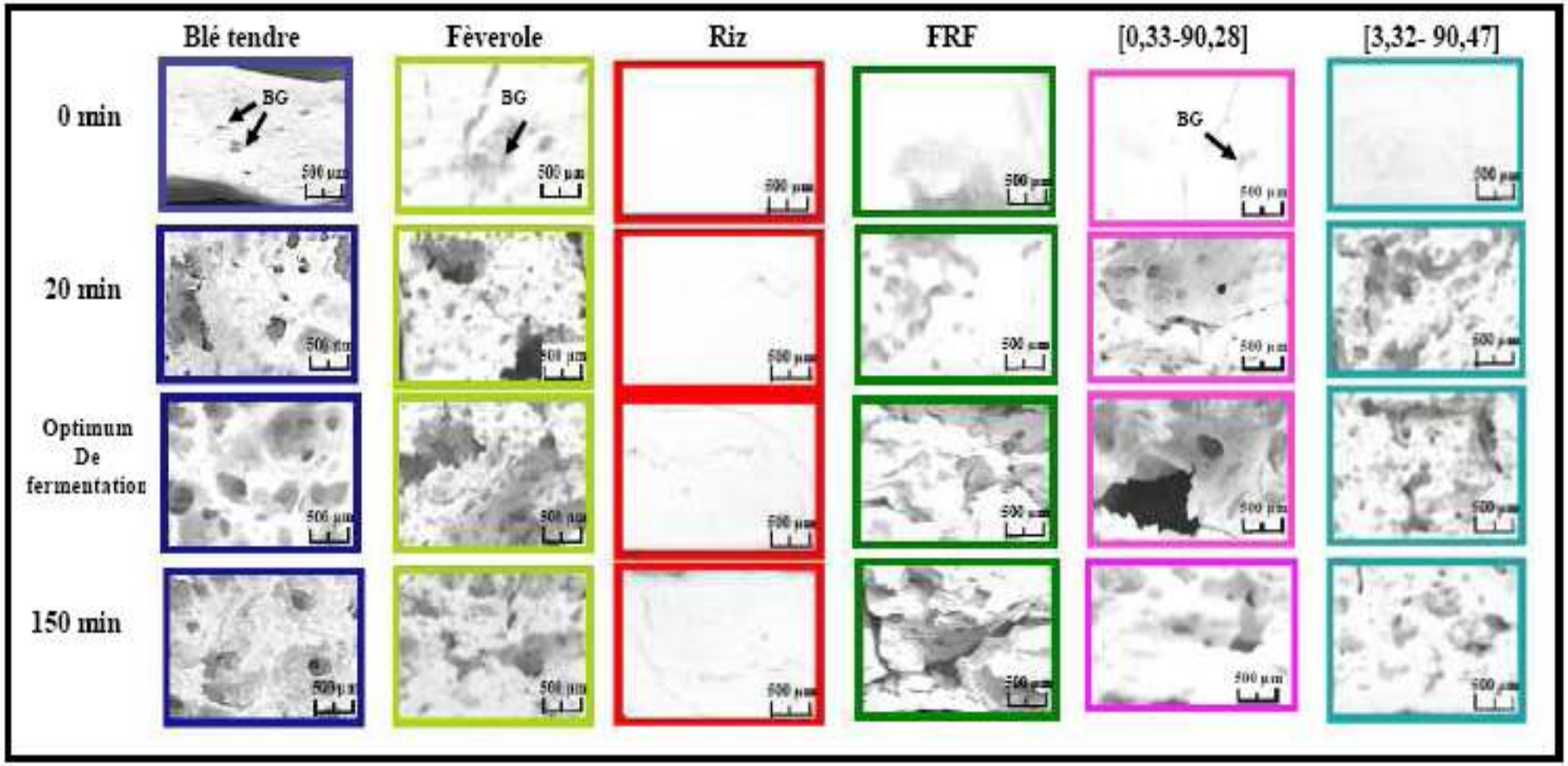


Figure 77. Microphotographies des matières premières et de la FRF exemptes de gluten et de deux couples HPMC-Hydratation.

chaleurs correspondant aux températures de cuisson (BELL 1990 ; DZIEZAK 1991. HAQUE et al.1993 ; SARKAR and WALKER 1995 ; BÁRCENAS and ROSELL 2005)

Imagerie des cinétiques de fermentation :

Des microphotographies portant sur le suivi de l'évolution de la microstructure de pâtes sans gluten de points sélectionnés (Tableau 29) pour la vérification de la MSR, au cours du processus de fermentation ont été réalisées. Seules quelques points jugés représentatifs ont été reportés sur la figure 77.

Immédiatement après pétrissage (0 min de fermentation), seules les pâtes du témoin blé tendre et de fèverole montrent la formation de microalvéoles tel que citée par FEILLET 2000 pour des pâtes à pain de blé tendre. Pour les autres points (figure 77), les microalvéoles sont soit absentes soit pas très nettes. La présence de fractures dans la plus part des coupes longitudinales des pâtons sans gluten rend la localisation et la visualisation des bulles de gaz assez difficiles. En effet, l'absence du réseau de gluten rend ces pâtons fragiles contrairement à ceux du témoin de blé tendre. Les fortes pressions appliquées au cours de l'étape de sublimation fissurent ces pâtons rendant la réalisation de coupes longitudinales ou transversales et par conséquent les observations délicates.

Après 20 min de fermentation, une augmentation du volume des alvéoles est notée pour les pâtes du témoin, de la fèverole ajouté et pour les couples HPMC-Hydratation [0,33-90,28] et [3,32-90,47] ainsi que ceux non montrés sur la figure 77.

A l'optimum de fermentation, le témoin à base de blé tendre permet la visualisation du gluten comme un réseau continu structuré de filaments orientés dans lequel viennent s'enchâsser des cellules gazeuses à prédominance larges et oblongues reflétant sa résistance élevée aux pressions du CO_2 (HAYMAN, HOSNEY and FAUBION 1998). Pour les pâtes de riz aucune structure alvéolaire n'a été notée. Le reste des pâtes avec ou sans HPMC, présentent à leur optimum de fermentation quelques larges cellules gazeuses contre une majorité de petites et rondes. A ce stade de fermentation, on peut bien visualiser l'aspect plus lisse des pâtes notamment à travers l'observation des parois alvéolaires. Aucune différence n'est notée entre les microphotographies de l'optimum et celles obtenues à 150 min de fermentation.

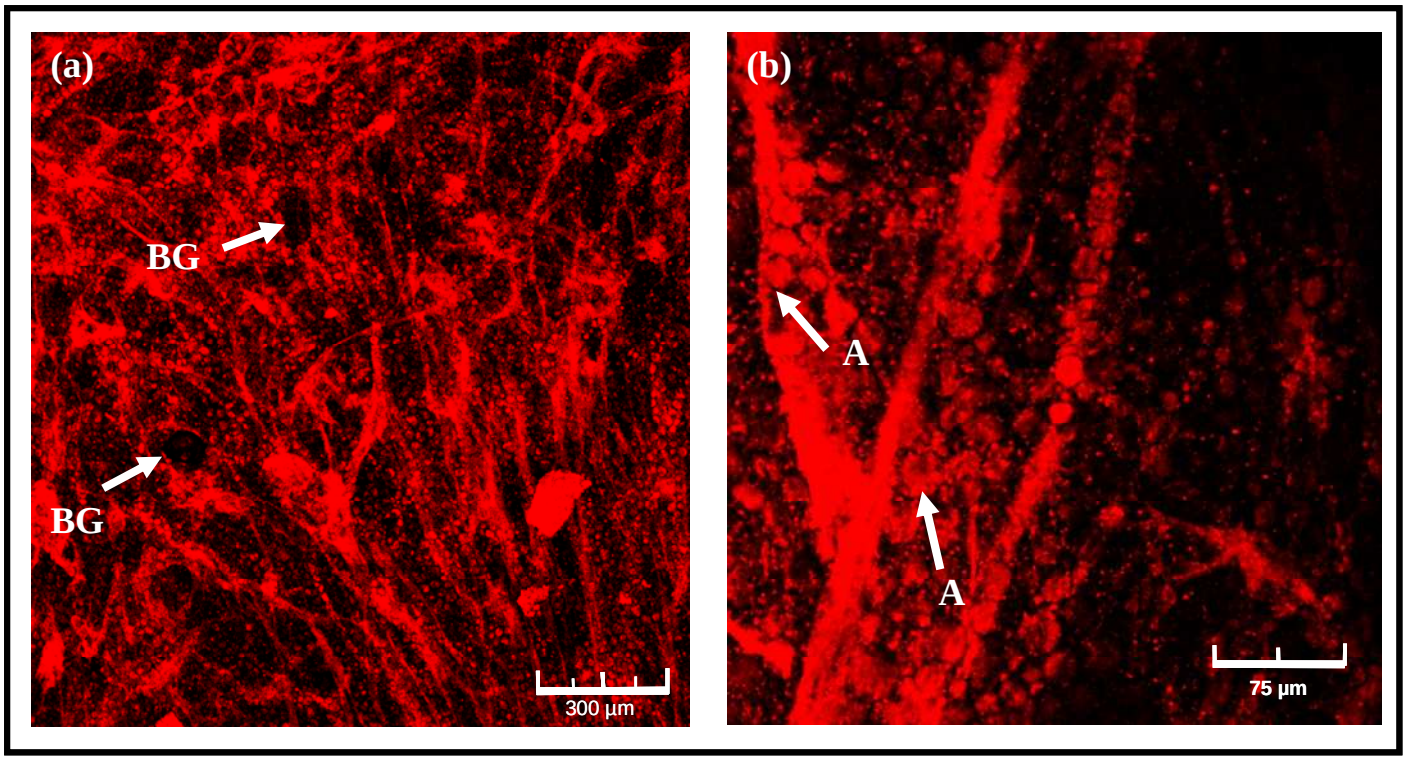


Figure 78. Observations en microscopie confocale (a) : (×10) et (b) (×40) de la pâte témoin de blé tendre. A : grains d'amidon, BG : bulles de gaz

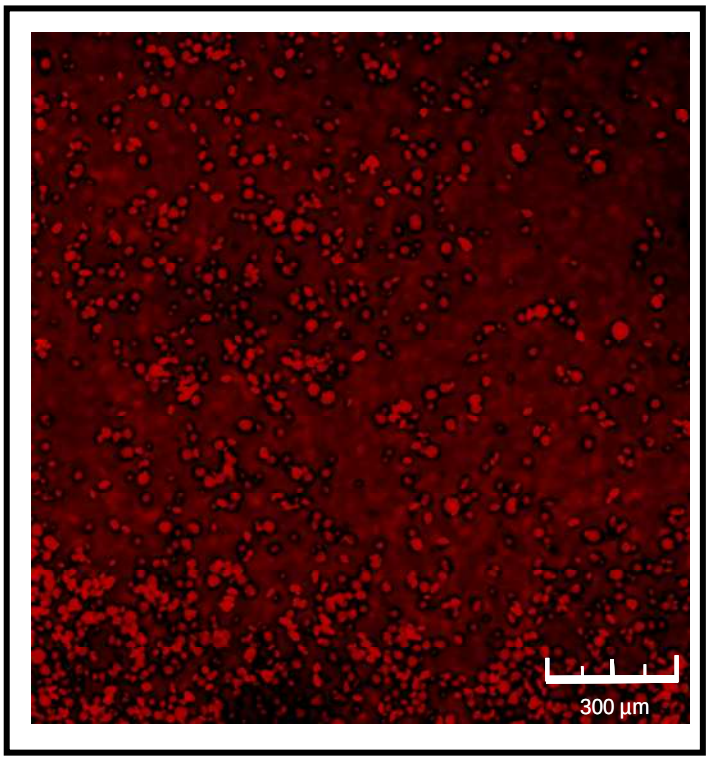


Figure 79. Observations en microscopie confocale (×10) d'une solution d'amidon de blé tendre à 0,1% (g d'amidon pour 100 g d'eau distillée).

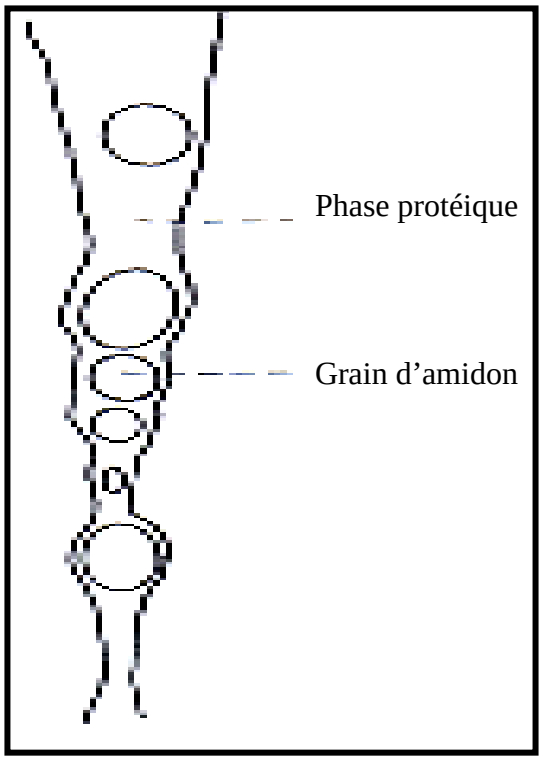


Figure 80. Représentation schématique des grains d'amidon enchâssés dans la phase protéique (adapté par BLOKSMA 1990b)

En conclusion, malgré les difficultés de découpe des pâtons lyophilisés par rapport à leur fissuration au cours de l'opération de lyophilisation (fragilité des pâtons fermentés), cette technique est un bon outil d'étude du suivi des cinétiques d'expansion nécessitant toutefois des améliorations.

II.5.2. Microstructure des pâtes

Dans ce travail, la MCBL a été utilisée comme outil de validation des résultats d'optimisation en vue de la panification de la FRF approchés par MSR. Dans le tableau 29, est résumé l'ensemble des points testés.

Les images de visualisation de la microstructure de la pâte par microscopie confocale montrent pour le témoin de blé tendre (Figures78a et b), l'organisation du **réseau de gluten** marqué avec la Safranine O-dye. Donné en rouge ici, il se présente comme un réseau continu structuré d'agrégats de protéines sous forme de fibres dans lesquelles viennent s'enchâsser des formes ovoïdes à lenticulaires de tailles comprises entre 10 et 50 µm. Ces formes marquées par la Safranine O-dye pourraient bien correspondre aux **grains d'amidon** (marque "A" Figure 78b), sachant que ceux-ci sont entourés d'une fine pellicule protéique. Des observations de grains d'amidon de blé natif par MBCL (Figure 79) viennent confirmer ces observations. BLOKSMA 1990b décrit bien également la phase protéique correspondant au réseau de gluten où viennent se loger les grains d'amidon (Figure 80), ce qui va dans le même sens que nos observations. La visualisation des pâtes témoin de blé tendre juste après pétrissage et sans étape de fermentation permet d'observer par différenciation les bulles de gaz sous forme de tâches noires sphériques ou ovoïdes (marque "BG" Figure 78a).

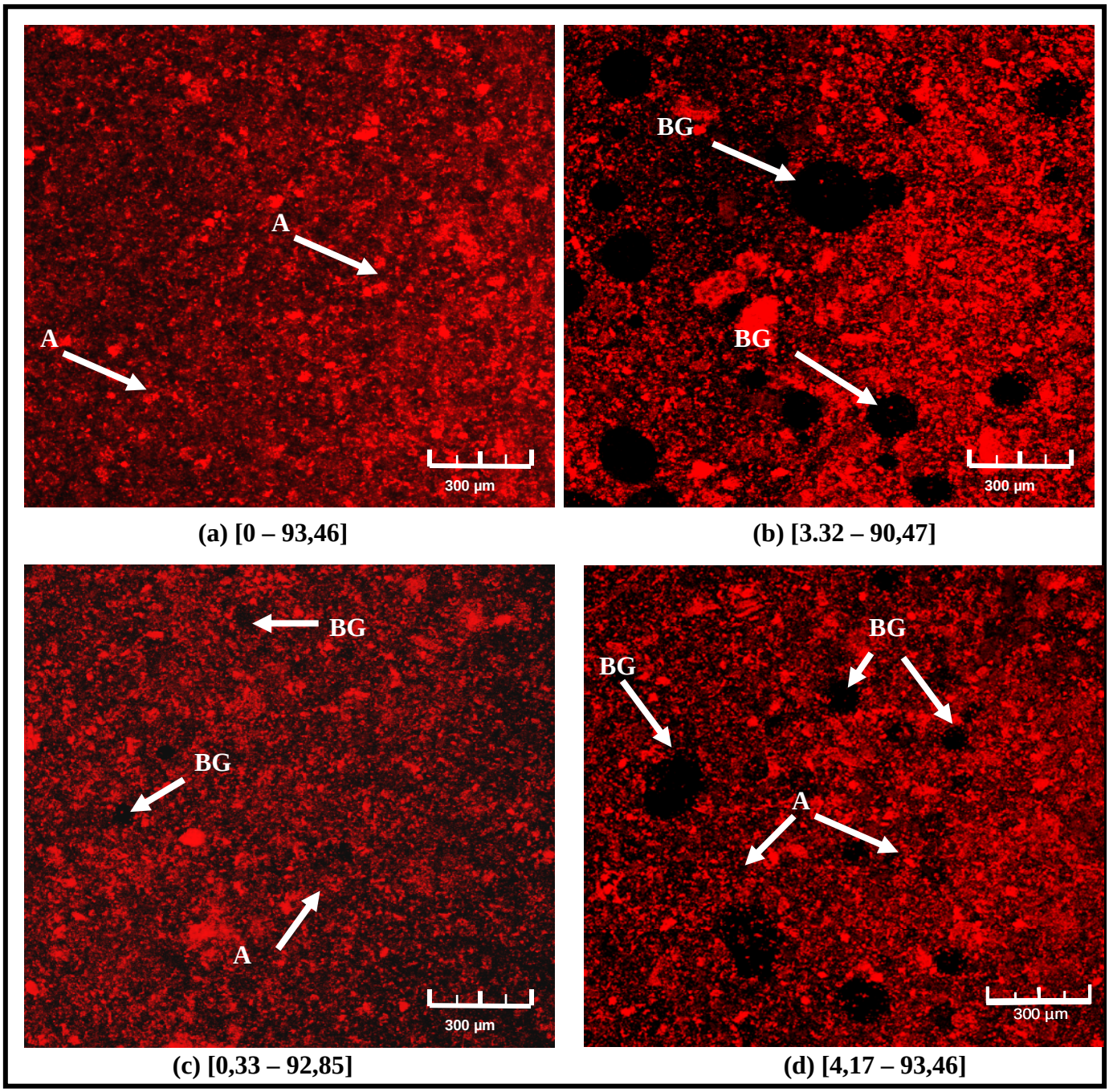


Figure 81. Echantillons de microphotographies de pâtes à pains sans gluten (×10) de la formule RF à différents taux d'HPMC et d'hydratation (g pour 100 g de matière fraîche). A l'intérieur des domaines optima : (c) [0,33–92,85] et (b) [3,32–90,47]. En dehors des domaines optima : (a) [0–93,46] et (d) [4,17–93,46]. A. Grains d'amidon, BG : Bulles gazeuses.

Dans la Figure 81 ne sont présentées que les échantillons jugés représentatifs de la batterie d'images effectuées sur des pâtes à pains sans gluten de la formule RF à différents taux d'HPMC et d'hydratation (Tableau 29). Avec (Figure 81b, c et d) ou sans HPMC (Figure 81a), le résultat le plus pertinent observé est **l'absence de réseau protéique** orienté dans le cas des pâtes de la formule RF. Ceci a également été noté sur des pâtes à pain sans gluten à base de farine de soja, d'œufs, d'amidon de pomme de terre, d'amidon de maïs, de protéines de lait, de riz brun ou de farine de sarrasin à différentes proportions marquées par le O dye Safranine (MOORE *et al.* 2004 ; Moore *et al.* 2006). Le point caractéristique de la pâte (a) qui se désigne par l'absence d'HPMC est labsence de **bulles d'air** qui devraient être introduites dans la pâte au cours du pétrissage (BLOKSMA 1990a). Les pains issus de ce type de pâte auront par conséquent une structure compacte de mie non aérée se caractérisant par des Volumes spécifiques (Vsp) très bas. A l'opposé de ceci, toutes les pâtes contenant de l'HPMC même les points en dehors des domaines optima, se distinguent par la présence de bulles d'air sous forme de tâches noires avec des diamètres inclus dans l'intervalle [0 -350] µm. Ceci veut dire que l'ajout d'HPMC améliore probablement la rétention gazeuse des pâtes. La taille et la forme de ces bulles noires ne correspond pas avec celles des amidons de riz et de fèverole qui sont respectivement de forme polyédriques et ovoïdes et, dont le diamètre varie de 3 à 50 µm (DUPRAT *et al.* 1980 ; JULIANO 1994 ; CERMAV/CNRS/INRA 2007).

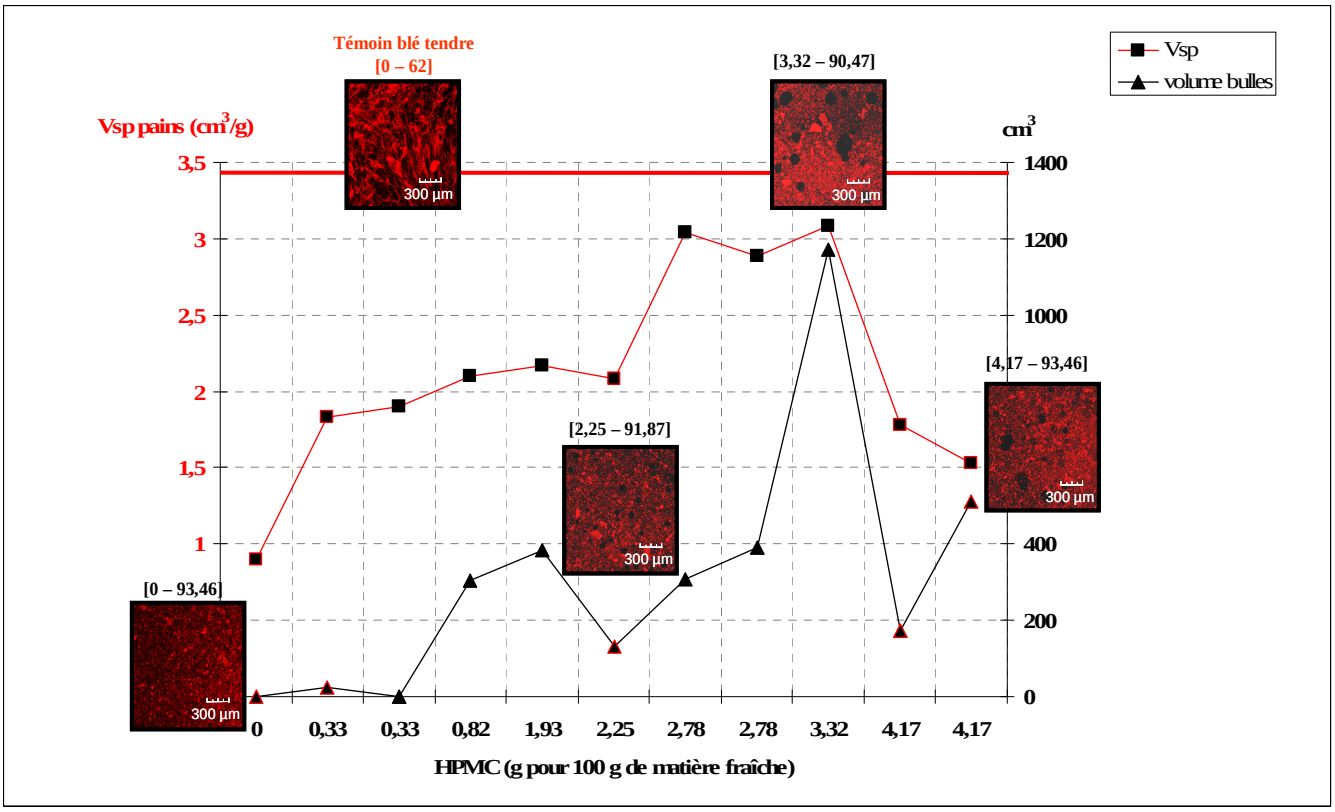


Figure 82. Evolution du volume spécifique (Vsp) des pains et du volume des bulles leur correspondant sur des couples HPMC-Hydratation dans les domaines optima (■ et ▲) et en dehors des domaines optima (■ et ▲)

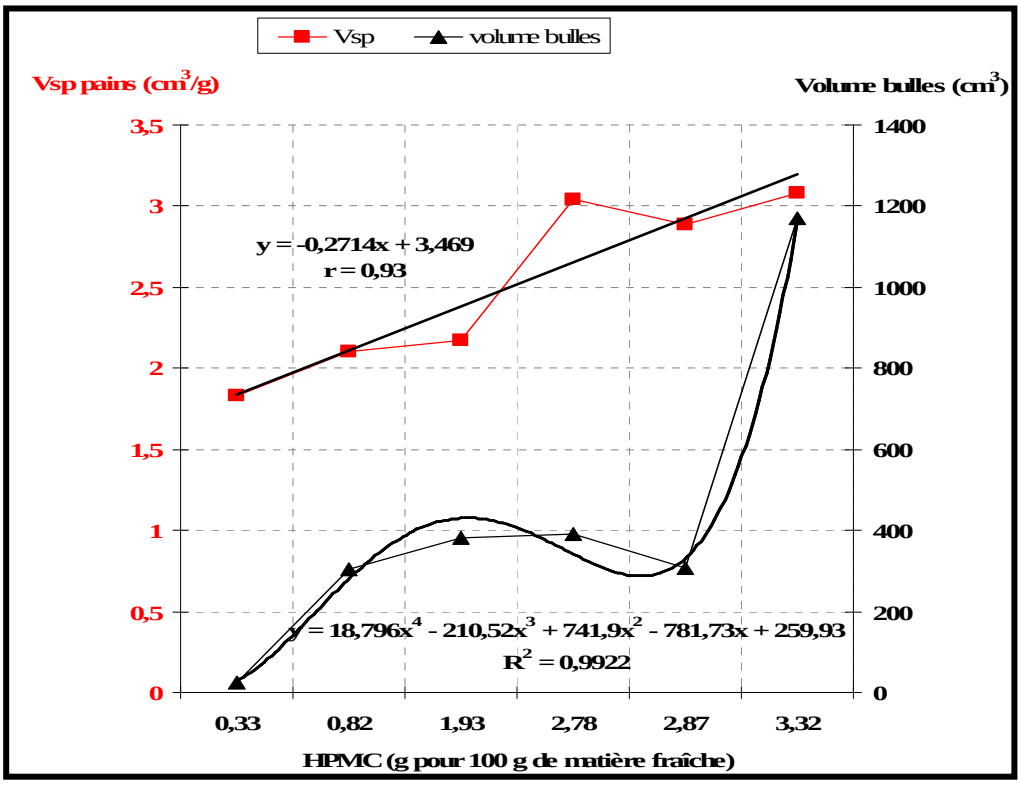


Figure 83. Evolution du volume spécifique (Vsp) des pains et du volume des bulles leur correspondant sur des couples HPMC-Hydratation dans les domaines optima.

Le suivi de l'évolution des volume spécifique des pains et des bulles gazeuses dans les pâtes à pain de la formule RF en fonction des taux d'HPMC est reporté sur la figure 82. Sur cette figure, on retrouve les couples [HPMC-Hydratation] en dehors des domaines optima et ceux dans les domaines optima.

La courbe du Volume Spécifique (Vsp) des pains sans gluten (PSG) évolue parallèlement à celle du volume total des bulles gazeuses dans les pâtes correspondantes. Le couple HPMC-Hydratation [0 – 93,46] correspond aux PSG ayant le plus faible Vsp avec absence de bulles dans la pâte. Une proportionnalité entre le Vsp des pains et les taux d'HPMC ajoutés est notée pour les couples HPMC-Hydratation se trouvant à l'intérieur des domaines optima ($r = 0,93$; Figure 83). De même, à l'intérieur de ces domaines optima, le volume total d'air incorporé au cours du pétrissage évolue de façon polynomiale (Figure 83). Il augmente de 0,33% jusqu'à 1,93% pour se stabiliser vers les taux de 2,78% et croît de nouveau pour arriver à l'optimum qui est de 3,32% d'HPMC. Ce point qui correspond au meilleur résultat obtenu en Vsp ($(3,08 \pm 0,10$ cm^3/g) et qui se rapproche le plus du témoin de blé tendre ($3,38 \pm 0,07$ cm^3/g), coïncide avec l'aération de la pâte la plus importante (1170,14 cm^3).

Les points hors domaines optima entourés par un trait rouge dans leur légende (Figure 82) correspondent soit à de faibles taux d'HPMC, insuffisants pour permettre une rétention gazeuse soit à des nivaux trop élevés de cette gomme déséquilibrant ainsi les propriétés viscoélastiques des pâtes rendant difficiles l'incorporation d'air ainsi que l'expansion gazeuse au cours de la fermentation et la cuisson. Les faibles valeurs de Vsp et de volume total des bulles enregistrés (Figure 83) en sont témoins.

L'effet améliorant de l'HPMC sur le volume final des pains a été reporté par de nombreux auteurs (BELL 1990 ; METTLER & SEIBEL 1993 ; ROSELL *et al.* 2001 GUARDA *et al.* 2004 ainsi que BÁRCENAS & ROSELL 2005. L'habilité de l'HPMC à améliorer le volume final des pains pourrait être attribué au fait que lorsque les chaînes de ce polymère sont soumises à de hautes températures, elles relâchent les molécules d'eau auxquelles elles sont associées permettant de fortes interactions entre les chaînes d'HPMC et par conséquent, la création d'un réseau temporaire qui se rapprocherait de celui du gluten par son rôle de rétention gazeuse mais qui se désintègrerait au cours du refroidissement

des pains (BELL 1990 ; BÁRCENAS & ROSELL 2005. D'après BELL 1990 ;DZIEZAK 1991 ; HAQUE *et al.* 1993 ainsi que SARKAR & WALKER 1995, ce réseau d'HPMC va apporter de la force aux cellules gazeuses de la pâte dans les premières étapes de cuisson. Sous l'effet de la chaleur, celles-ci s'expanseront avec un minimum de pertes gazeuses. En retour, le volume des pains sera amélioré.

La MCBL utilisée comme outil de vérification des résultats de formulation et fabrication de PSG de la FRF approchés par MSR a pu confirmer avec succès nos résultats. Pour le témoin de blé tendre, le réseau de gluten se présente comme une structure continue formée d'agrégats de protéines sous forme de fibres bien orientées dans lesquelles s'enchâssent des formes ovoïdes à lenticulaires pouvant correspondre à des grains d'amidon. Aucun réseau protéique orienté n'est observé pour la FRF à différents taux d'HPMC. Pour des pâtes exemptes de cet hydrocolloïde, on a pu noter l'absence totale de bulles d'air. De manière générale, le volume total d'air incorporé dans les pâtes à PSG évolue dans le même sens que les Vsp des pains. Alors que ce dernier est proportionnel aux taux d'HPMC à l'intérieur des domaines optima (r = 0,93), le volume des bulles d'air incorporé au cours du pétrissage suit une loi polynomiale avec les niveaux d'HPMC incorporés (r=0,99) pour atteindre un maximum vers les valeurs de 3,32%.

II.5.3. Propriétés rhéologiques des pâtes des points de vérification

L'étude des propriétés rhéologiques des points de vérifications (Tableau 29), à travers l'évaluation de leurs propriétés alvéographiques et viscoélastiques a été choisie comme outil de validation des résultats d'optimisation de la FRF à différents taux d'HPMC pour la fabrication de PSG.

II.5.3.1. Propriétés Alvéographiques

Les caractéristiques rhéologiques moyennes des couples HPMC-Hydratation des points de vérification (Tableau 29) de l'optimisation des PSG par MSR ont été étudiées par l'Alvéographe Chopin (Tableau 30).

Tableau 30. Caractéristiques alvéographiques des farines de blé tendre, de matières premières et formules exemptes de gluten

Couples HPMC-Hydratations	G (cm^3)	P/L	W (10^{-4}) J
Témoin :			
Blé tendre (*Kenza*)	17,8 ± 0,02	1,21 ± 0,01	180 ± 0,03
Domaines optima :			
Domaine I			
[2,78 - 93,18]	7,4 ± 0,3	2,7 ± 0,3	11,44 ± 0,6
[2,78 - 92,73]			
[1,93 - 92,66]	8 ± 0,2	1,28 ± 0,7	6,54 ± 0,5
[0,82 - 92,80]	7 ± 0,3	1,26 ± 0,3	6,54 ± 0,3
[0,33 - 93,46]	7,5 ± 0,7	1,25 ± 0,1	6,54 ± 0,7
Domaine II			
[3,32 - 90,47]	11,5 ± 0,4	1,54 ± 0,7	32,7 ± 0,3
Hors domaines optima :			
[0,33-90,28]	6,5 ± 0,7	2,1 ± 0,3	6,54 ± 0,5
[4,17 - 90,28]	3,5 ± 0,5	2,68 ± 0,7	3,27 ± 0,7
[4,17 - 93,46]	6,75 ± 0,3	1,18 ± 0,5	6,54 ± 0,3
[2,25 - 91,87]	5,33 ± 0,5	2,40 ± 0,3	3,27 ± 0,5

G : Gonflement (cm^3), P/L : Rapport de configuration, W (10^{-4}) : Travail de déformation (J)

Les caractéristiques alvéographiques des couples de vérification HPMC-Hydratation, à l'intérieur ou en dehors des domaines optima sont pour le gonflement (G) et le travail de déformation (W), inférieures à celles du témoin de blé tendre , aux normes algériennes de panification données par J.O.R.A. 1991 : (W) entre (130 et 180) $\times 10^{-4}$ J et G> 20 cm^3 ainsi qu'aux normes françaises de panification (GUINET et GODON 1994) : (W) entre (200 et 250) $\times 10^{-4}$ J et (G) > 20 cm^3. Pour le rapport de configuration P/L, les résultats des points testés restent supérieurs à ceux donnés par la réglementation algérienne J.O.R.A. 1991 (entre 0,45 et 0,65) ou française (GUINET et GODON 1994) : entre 0,5 et 0,7.

La comparaison des propriétés rhéologiques des ingrédients sans gluten et sans HPMC ajouté (tableau 27) et avec ajout d'HPMC (Tableau 30), montre globalement l'absence d'améliorations significatives. Le meilleur couple HPMC-Hydratation correspond au point du domaine II ([3,32 - 90,47]), pour lequel ont été enregistrés les meilleures valeurs de travail de

déformation (W = 32,7 ± 0,3)×10^{-4} J et gonflement 11,5 ± 0,4 cm^3. Par ailleurs son rapport de configuration P/L (1,54 ± 0,7) n'a significativement pas changé par rapport à la FRF sans gluten et reste non conforme aux normes algériennes et françaises. L'Alvéographe Chopin demeure donc un outil non prédictif de l'aptitude à la panification des pâtes sans gluten.

En finalité, c'est le couple [3,32 - 90,47] du domaine optimum II qui présente les meilleures caractéristiques alvéographiques tout en restant inférieures aux valeurs du témoin de blé tendre ainsi qu'aux aux normes algériennes et françaises de panification. De façon globale, l*es caractéristiques alvéographiques des points de vérification ne montrent pas d'améliorations permettant de prédire tel ou tel couple HPMC-Hydratation en panification. Néanmoin, ces mauvais résultats ne peuvent pas préjuger à eux seuls de la qualité boulangère des couples HPMC-Hydratation, notamment ceux à l'intérieur des domaines optima, vu que l'HPMC agît certes en tant qu'agent épaississant dans les pâtes mais reste une gomme qui se caractérise par la formation d'un réseau perméable au CO_2 aux fortes températures correspondant à l'étape de cuisson.*

II.5.3.2. Propriétés viscoélastiques

La confirmation de la validité des domaines optima a également été réalisée par l'estimation des propriétés viscoélastiques (G′, G″ tan δ) des points de vérification données dans le tableau 31.

Les valeurs de tan δ des PSG de la FRF (Tableau 31), sont du même ordre de grandeur que celles du témoin de blé tendre (0,50), montrant que les pâtes sans gluten obtenues pour ces cinq points issus de ces domaines optima sont effectivement deux fois plus élastiques que visqueuses. Les valeurs de G′ et de G" ne correspondant pas au niveau du témoin (G′ 27300 Pa= et G" = 13792,76 Pa) pourrait être expliquées par le fait que leur courbes de niveaux n'ont pas montré de zones d'intersections lors de l'optimisation. Par ailleurs, le rapport G″/G′ reste valide pour les cinq points sélectionnés à l'intérieur des domaines optima. En dehors des domaines optima, les niveaux de tan δ sont soit trop élevés soit trop faibles.

Tableau 31. Propriétés viscoélastiques des points de vérification de l'optimisation de l'ajout d'HPMC à la FRF approché par MSR.

Couples HPMC-Hydratations (g pour 100 g de formule fraîche)	**G' (Pa)**	**G"(Pa)**	**tan δ**
Témoin : **Blé tendre (*Kenza*)**	27300	13792,76	0,50
Domaines optima :			
Domaine I			
[2,78 - 93,18]	7750	3952,5	0,51
[2,78 - 92,73]	5500	2915	0,53
[1,93 - 92,66]	760	395	0,52
[0,82 - 92,80]	550	300	0,52
[0,33 - 93,46]	75	40,67	0,54
Domaine II			
[3,32 - 90,47]	9900	5049	0,51
Hors domaines optima :			
[0,33-90,28]	72280	15000	0,20
[4,17 - 90,28]	79780	46000	0,57
[4,17 - 93,46]	117280	78000	0,66
[2,25 - 91,87]	94780	75000	0,79

En conclusion, l'étude des propriétés viscoélastiques des couples HPMC-Hydratation testés (en dehors et dans les domaines optima) informe bien sur les propriétés rhéologiques des pâtes à PSG. Tous les points appartenant aux domaines optima sont deux fois plus élastiques que visqueux pareillement que le témoin de blé tendre renseignant sur la validité des résultats d'optimisation de la FRF avec ajout d'HPMC et approchée par MSR. Toutefois, ces mesures à elles seules ne peuvent être qu'un outil de confirmation du niveau de viscoélasticité des couples appartenant aux domaines optima. Les tests de panification restent les seuls révélateurs de la meilleure texture de mie des PSG fabriqués se rapprochant le plus de celle du témoin de blé tendre.

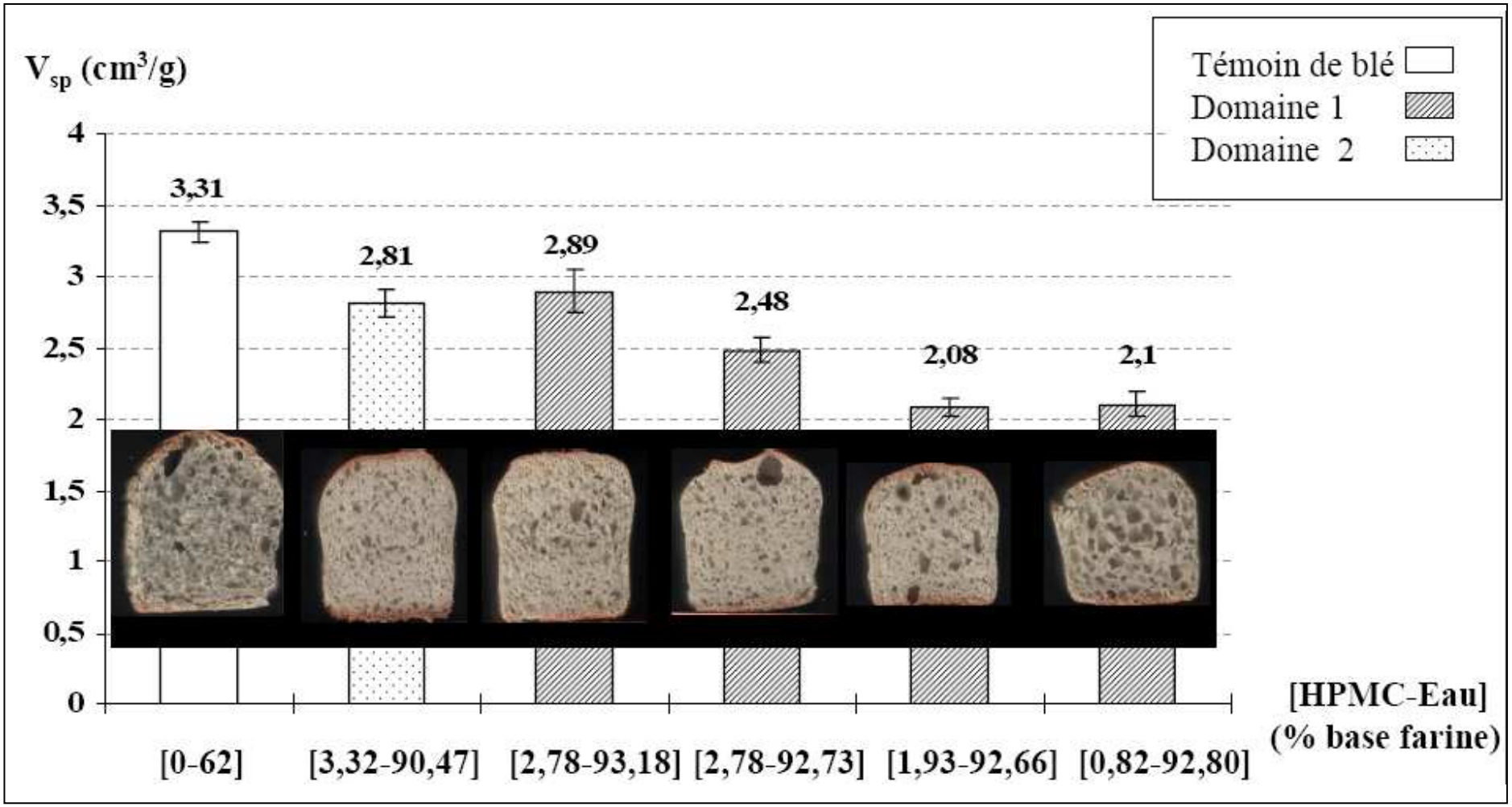


Figure 84. Représentation des Volumes spécifiques (Vsp) et du grain de mie des cinq couples [HPMC-Hydratation] représentatifs des domaines optima pour la FRF.

II.5.4. Tests de panification

Les tests de panification restent le principal outil de vérification de la qualité finale d'une pâte en général et des résultats d'optimisation d'ajout d'HPMC à la FRF approchée par MSR dans le cadre de cette étude. Ces tests vont permettre notamment de vérifier les Vsp des PSG mais également la texture de leurs mies par l'examen de plus près de leur grain (grossier, fin, à bulles gzeuses rondes, oblongues, ...).

L'évaluation des propriétés viscoélastiques des points de vérification (Tableau 29) a montré que tous les couples HPMC-Hydratation hors domaines optima avaient des niveaux de viscoélasticité qui ne correspondaient pas à celui du témoin de blé tendre (tan δ = 0,50) renseignant sur des pâtes deux fois plus élastiques que visqueuses. En se basant sur ces résultats, nous n'avons effectué les tests de panification que sur les points issus des domaines optima.

Les tests de panification (Figure 84) ont donné des pains avec différentes alvéolations de mie et différents Vsp. Aux faibles taux d'HPMC, de grosses cellules gazeuses avec une distribution hétérogène est notée contre une distribution plus homogène avec plus de petites cellules gazeuses vers les taux élevés d'HPMC allant vers des textures plus fines. L'alvéolation de mie reste, par ailleurs, légèrement plus grossière que cellle du pain témoin. Les Vsp des PSG de la FRF (Figure 84) sont significativement proportionnels aux taux d'HPMC (r = 0,95) tout en restant, inférieurs à celui du témoin (p < 0,0001). De plus, pour un même taux d'HPMC, l'augmentation du niveau d'eau se traduit par un accroissement significatif (p<0,0001) du Vsp des pains tel que montré pour les couples HPMC-Hydratation [2,78-92,70] et [2,78-93,18] avec des VSP respectifs de 2,48 0,04 ± et 2,89 ± 0,07 cm^3/g. Des résultats similaires ont été repporté par GALLAGHER *et al.* 2003 et MC CARTHY *et al.* 2005 pour des pains à base de riz. L'échantillon de PSG qui a donné le VSP le plus proche du témoin de blé tendre (3,31 ± 0,07 cm^3/g) correspond au couple HPMC-Hydratation [2,78-93,18] avec 2,89 ± 0,07 cm^3/g suivi de [3,32-90,47] avec 2,81 ± 0,04 cm^3/g.

En conclusion, les Vsp des PSG de la FRF dans les domaines optima sont significativement proportionnels aux taux d'HPMC (r = 0,95) tout en restant, inférieurs à celui du témoin (p < 0,0001). L'échantillon de PSG qui a donné le VSP le plus proche du

témoin de blé tendre (3,31 ± 0,07 cm^3/g) correspond au couple HPMC-Hydratation [2,78-93,18] avec 2,89 ± 0,07 cm^3/g suivi de [3,32-90,47] avec 2,81 ± 0,04 cm^3/g. Le grain de mie des PSG reste, par ailleurs, légèrement plus grossier que celui du témoin de blé tendre.

II.5.4.1. Pertes d'eau et cinétique d'expansion des pains au cours du processus de panification (fermentation et cuisson)

- ***Pertes d'eau***

La perte d'eau au cours du processus de cuisson a été étudiée sur les couples HPMC-Hydratation issus des domaines optima. Ce paramètre est obtenu par différence de poids entre les pâtes en début de fermentation et les PSG refroidis 30 min après sortie du four. Les calculs sont rapportés à 100 g de pâte avant fermentation. Les valeurs chiffrées sont reportées dans le tableau 32.

Tableau 32. Perte d'eau des PSG fabriqués à partir des couples HPMC-Hydratation issus des domaines optima

HPMC – Hydratation	**Perte d'eau %** **(g pour 100 g de pâte en début de fermentation)**
Blé tendre	19,16 ± 0,08
[0,33-92,85]*[1]*	20,84 ± 0,05
[0,82-92,80]*[1]*	20,63 ± 0,08
[1,93-92,66]*[1]*	17,60 ± 0,04
[2,78-92,70]*[1]*	19,21 ± 0,03
[2,78-93,18]*[1]*	21,27 ± 0,03
[3,32-90,47]*[2]*	16,52 ± 0,08

[1]domaine 1, [2]domaine 2

Les PSG de la formule RF et le témoin de blé tendre perdent l'eau de manière significativement différente ($p < 0,0001$) au cours du processus de panification incluant les étapes de fermentation et de cuisson (tableau 32). Malgré la présence de réseau de gluten dans le témoin de blé tendre, ceci ne fait pas de lui le produit le plus imperméable aux pertes d'eaux (19,16 ± 0,08)%. Pour les PSG, la perméabilité aux différents gaz de panification (CO_2 et vapeur d'eau) est à son minimum pour les taux d'HPMC les plus élevés dans les domaines optima (3,32%) avec les pertes en eaux les plus basses (16,52 ± 0,08) % contre les pertes en

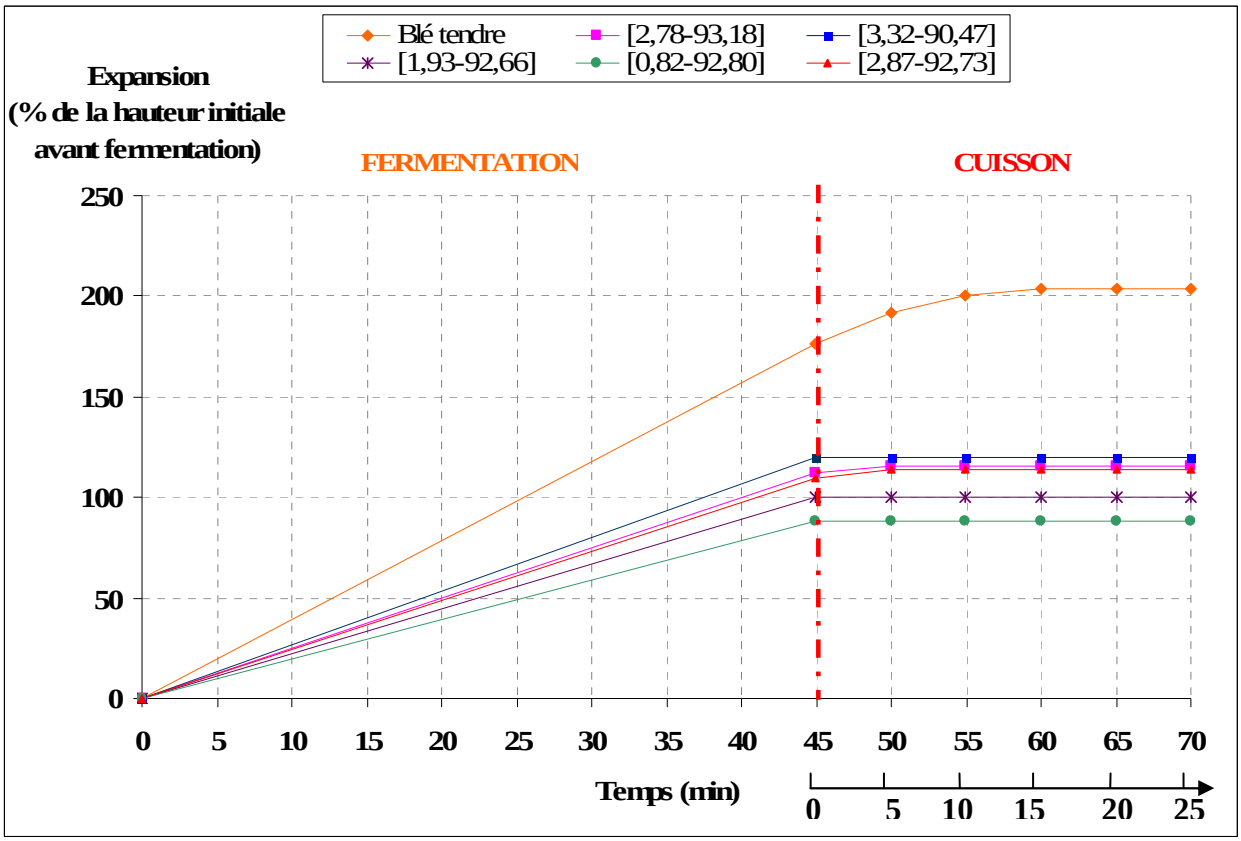


Figure 85. Cinétiques d'expansion au cours de la fermentation et de la cuisson des couples [HPMC-Hydratation] des domaines optima comparés au témoin de blé tendre.

eau les plus élevées aux bas niveaux d'HPMC respectivement (0,33 et 0,82%) avec (20,84 ± 0,05 et 20,63 ± 0,08) %. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'HPMC ne peut agir efficacement en tant qu'épaississant au cours de la fermentation ou former un réseau suffisamment étanche permettant la rétention gazeuse lors de l'expansion au four (BÁRCENAS and ROSELL 2005), qu'à un certain taux, ce qui se reflète par la proportionnalité entre les Vsp et les taux d'HPMC dans les domaines optima. Toute fois, l'évolution des pertes d'eau entre 0,33 et 3,32% d'HPMC dans ces domaines reste assez complexe. Elles continuent à diminuer pour le niveau d'HPMC de 1,93% puis augmentent et atteignent leur maximum pour le point [2,78-93,18] % probablement en raison de ses teneurs élevées en eau. Il faut noter également pour ces points que les taux d'HPMC et d'eau vont dans le même sens.

- ***Cinétiques d'expansion au cours de la fermentation et de la cuisson***

  Les cinétiques d'expansion des PSG comparées au témoin de blé tendre au cours du processus de panification (fermentation et cuisson) sont représentées sur la figure 85. Ces expensions sont exprimées en pourcent du volume initial des pâtons en début de fermentation.

  Le témoin de blé tendre s'expanse en moyenne environ 100 fois plus que les PSG fabriqués par les couples [HPMC-Hydratation] issus des domaines optima. Ceci pourrait probablement être le résultat de la présence du gluten dans le blé tendre ce qui favoriserait la rétention gazeuse au cours de l'expansion des gaz au four. Pour les PSG, ceux des couples [3,32-90,47]%, [2,78-93,18]% et [2,78-92,73] % arrivent en fin de cuisson au même taux d'expansion moyen de 117 % , qui reste significativement ($p < 0,01$) plus élevé que celui des couples [1,93-92,66]% et [0,82-92,80]%.

  Par ailleurs, alors que les pains du témoin de blé tendre continuent à s'expanser après la mise en four, aucune expansion au delà de celle notée en fin de fermentation n'est notée pour les PSG lors de la cuisson. Ceci montre que la structuration des PSG se fait essentiellement au cours de la fermentation. Le fait qu'il n'y ait pas affaissement au cours de la mise au four appuie l'hypothèse de BÁRCENAS and ROSELL 2005 qui soulignent

le rôle de l'HPMC dans la formation d'un réseau étanche à chaud favorisant la rétention gazeuse.

Le témoin de blé tendre atteint les 50°C après 5 min de mise en four. L'atteinte de cette température nécessite plus de temps pour les PSG (6 à 10 min), ce qui correspondrait d'après MOORE et HOSNEY 1985 ; BLOKSMA 1990a, à la température maximale pour laquelle les levures continueraient à produire du CO_2. La température continue à monter pour arriver à 60 °C après 10 min de mise en four pour le témoin de blé tendre et après 7 à 12 min pour les PSG. A cette température l'expansion observée uniquement sur le témoin de blé tendre serait essentiellement le résultat de l'évaporation du CO_2 (MOORE et HOSNEY 1985). Par ailleurs nos résultats de l'arrêt de l'expansion gazeuse qui sont de 100 °C pour le témoin de blé tendre contre 95°C pour les PSG, ne corroborent pas ceux données dans la littérature pour des pains à base de blé tendre qui varieraient selon MOORE et HOSNEY 1985 ainsi que BLOKSMA 1990a entre 70 et 80°C.

En conclusion, Les PSG de la FRF et le témoin de blé tendre perdent l'eau de manière significativement différente ($p< 0,0001$) au cours du processus de panification incluant les étapes de fermentation et de cuisson. Malgré la présence de réseau de gluten dans le témoin de blé tendre, ceci ne fait pas de lui le produit le plus imperméable aux pertes d'eaux ($19,16 \pm 0,08$)%. Pour les PSG, la perméabilité aux différents gaz de panification (CO_2 et vapeur d'eau) est à son minimum pour les taux d'HPMC les plus élevés dans les domaines optima (3,32%) avec les pertes en eaux les plus basses ($16,52 \pm 0,08$) % contre les pertes en eau les plus élevées aux bas niveaux d'HPMC (0,82%) avec ($20,63 \pm 0,08$) %. Les pains de blé tendre s'expansent significativement plus que ceux des PSG. Pour ceux-ci, ce sont ceux qui perdent le plus d'eau qui s'expansent le moins.

II.5.4.2. Propriétés texturales des mies par Analyse d'Image et classification des PSG par ACP

Les propriétés texturales de la mie des pains sans gluten de la FRF correspondant aux domaines optima en comparaison avec un témoin de blé tendre sont étudiées. Le traitement s'est fait selon une méthode d'analyse de texture d'images basée sur la morphologie mathématique. L'étude des variations de la somme des niveaux de gris lors d'érosions

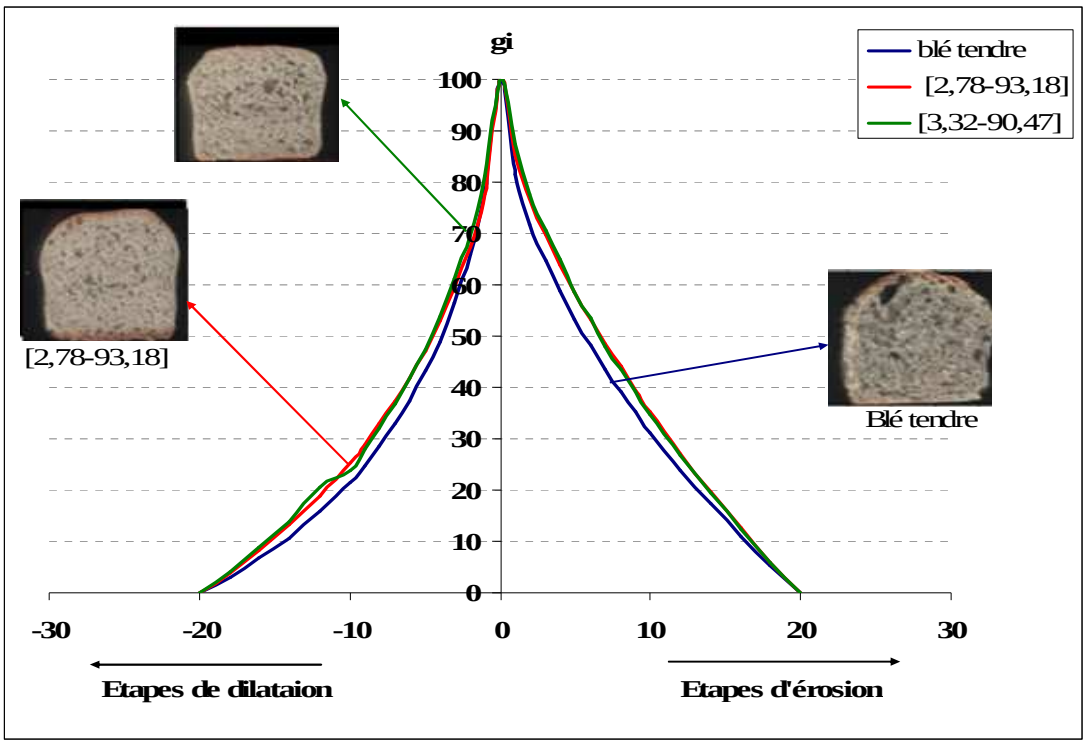


Figure 86. Courbes granulométriques en niveaux de gris des couples [HPMC-Hydratation] des meilleurs pains obtenus après le témoin de blé tendre.

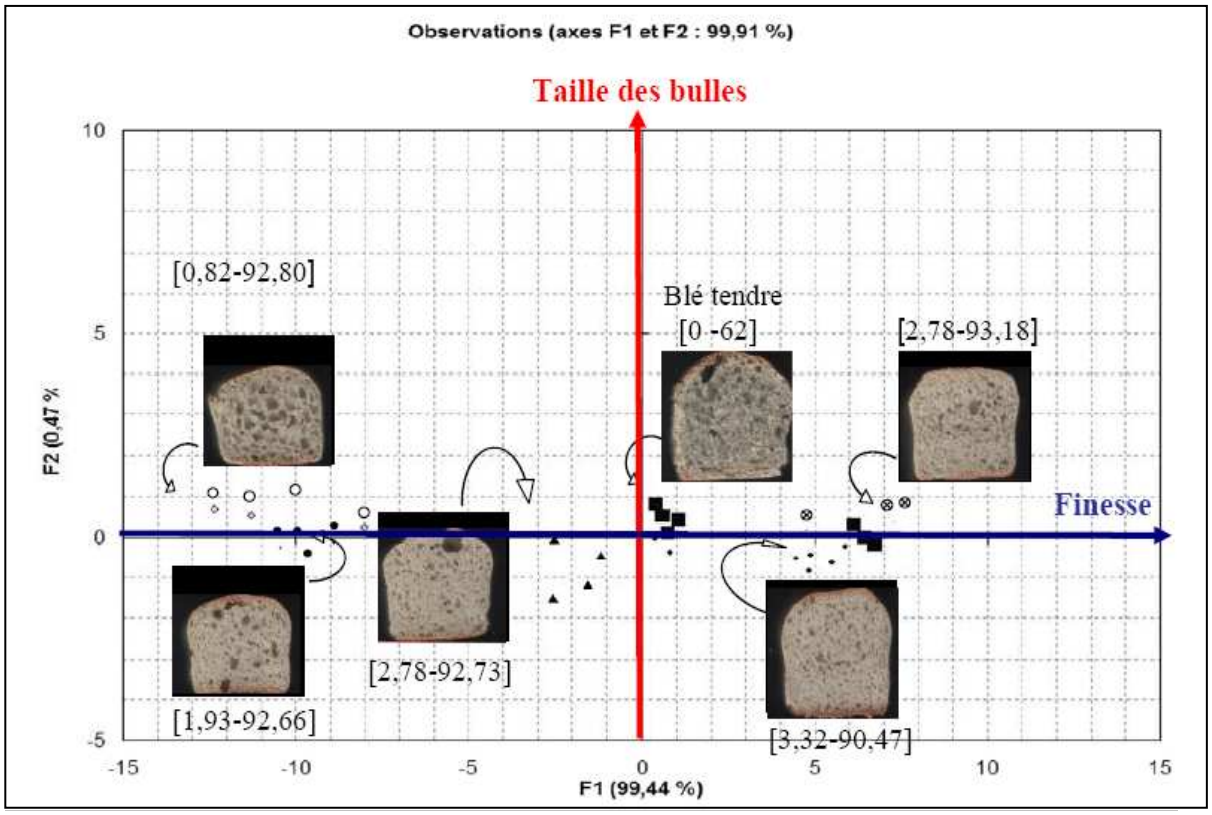


Figure 87. Carte de ressemblance par ACP sur les courbes de texture granulométriques des images de PSG des couples HPMC-Hydratation
issus des domaines optima

successives donne des informations de type granulométrique sur les parois des alvéoles. L'opération duale, la dilatation, permet d'obtenir une courbe de granulométrie en niveaux de gris des alvéoles qui complète celles des parois. La comparaison des variations de ces courbes a nécessité leur normalisation par rapport à la taille des tranches et leurs intensités lumineuses (Figure 86). Sur ces courbes, ne sont représentés que les meilleurs couples [HPMC-Hydratation] comparés au témoin de blé tendre. La partie droite de la figure décrit les variations de la taille des parois des alvéoles et la partie gauche la taille des alvéoles. La courbe de texture granulométrique normalisée du témoin de blé tendre se différencie nettement de celles des pains sans gluten. Le témoin de blé tendre semble avoir une texture plus fine et plus aérée que celle des échantillons de PSG étudiés. Par ailleurs, la comparaison des courbes des mies étudiées s'est faite par Analyse en Composantes Principales (ACP), ce qui permet d'établir une carte de ressemblances. L'interprétation de cette carte s'est fait d'après l'ordre dans lequel les images se placent ainsi que la forme des vecteurs propres.

L'Analyse en Composantes principales (ACP) (Figure 87), montre des variations de texture entre les mies de la formule RF incluant le témoin. Nous avons choisi de travailler avec les deux composantes principales ayant expliqué la variabilité la plus élevée (99,91 %), CP1 et CP2. Alors que la première composante principale (CP1) classe les pains en fonction de leurs Vsp avec les pains les plus légers à droite de la carte de ressemblance (témoin, [2,78-93,18], [3,32-90,47]), la deuxième composante (CP2) les classent du plus hétérogène avec une distribution multimodale de la taille des cellules gazeuses des mies (bas de la carte) contre les plus homogènes avec une distribution similaire des cellules gazeuses (haut de la carte). En conclusion, les PSG ayant le grain de mie et les VSP les plus proches au témoin (3,31 ± 0,07 cm^3/g), sont obtenus avec les couples respectifs HPMC-Hydratation [2,78-93,18] avec 2,89 ± 0,07 cm^3/g suivi de [3,32-90,47] avec 2,81 ± 0,04 cm^3/g.

La classification des PSG de la FRF issus des domaines optima basée sur les opérations de morphologie mathématique faite par analyse d'image a permis la discrimination de ces pains en fonction de leurs Vsp et grain de mie. La première composante principale semble classer les pains en fonction de leurs Vsp avec les pains les plus légers à droite de la carte de ressemblance (témoin, [2,78-93,18] et [3,32-90,47]). La deuxième composante (CP2) les classent du plus hétérogène avec une distribution multimodale de la

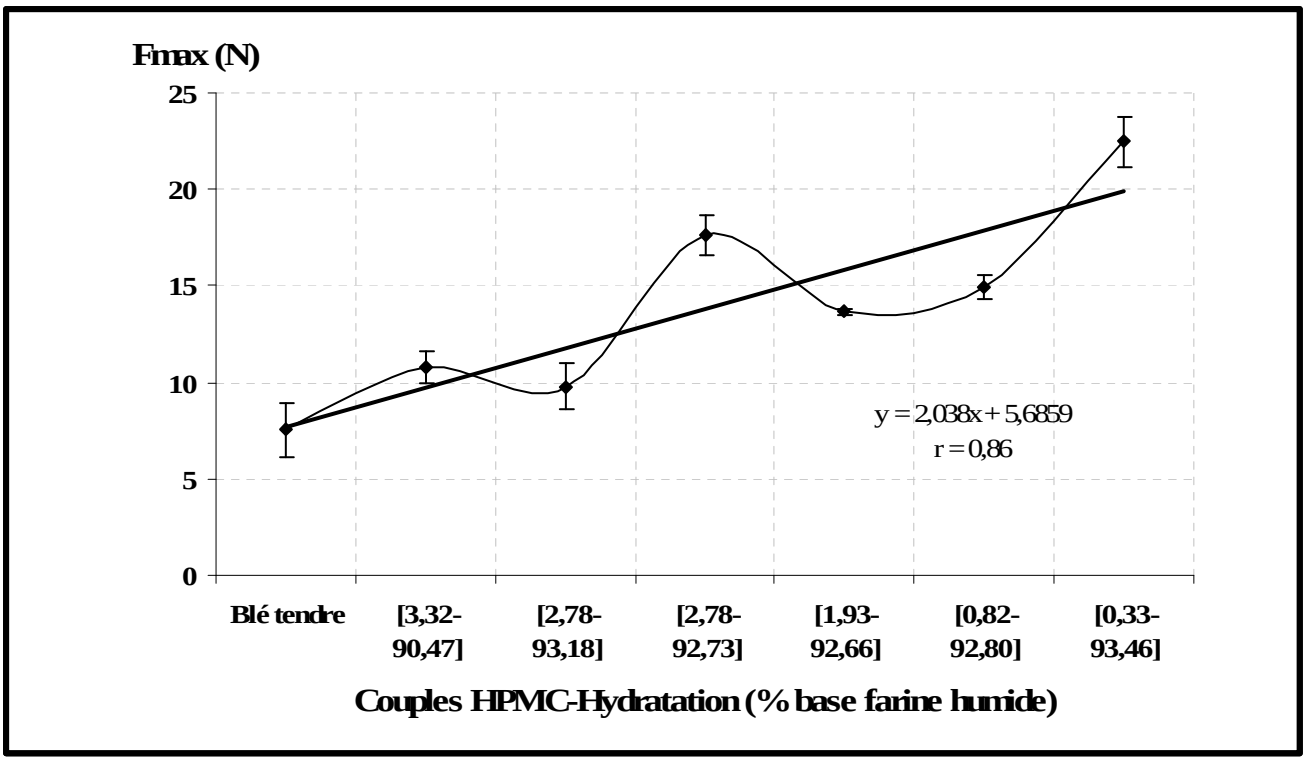


Figure 88. Evolution de la Force de compression maximale (Fmax) au niveau des couples HPMC-Hydratation appartenant aux domaines optima.

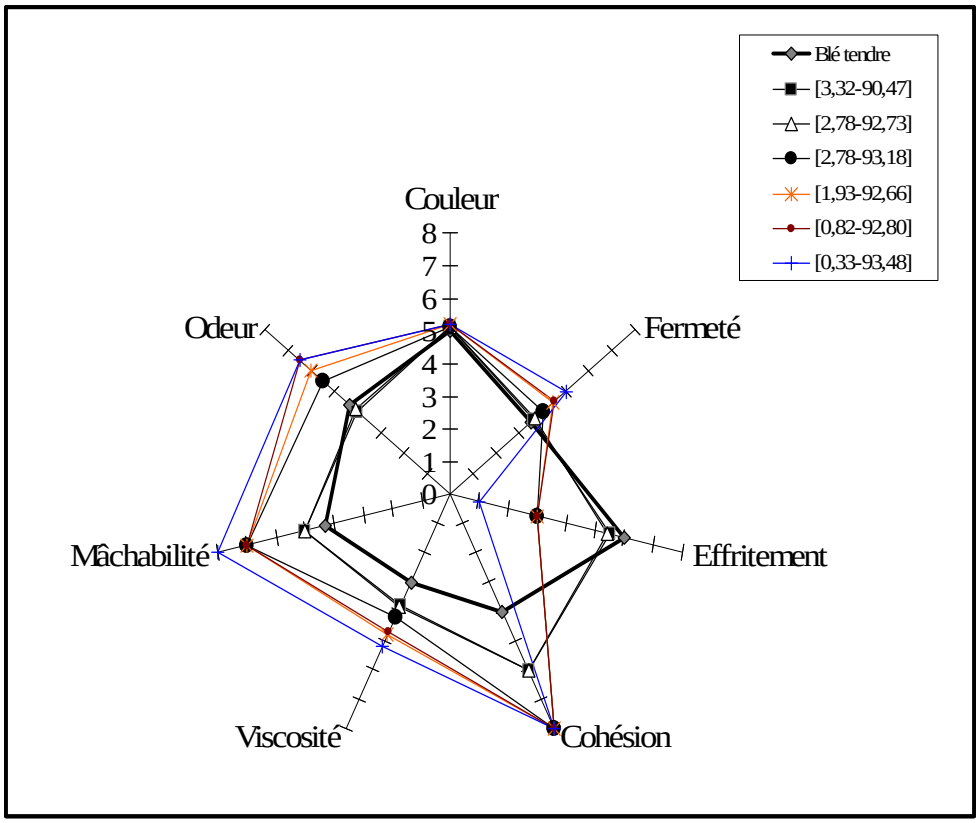


Figure 89. Classification par rang de *Friedman* des PSG issus des domaines optima.

taille des cellules gazeuses des mies (bas de la carte) contre les plus homogènes avec une distribution similaire des cellules gazeuses (haut de la carte).

II.5.4.3. Propriétés mécaniques des mies par le test de Compression-Relaxation au TA.X-T2i

Les essais de compression ont été menés sur des échantillons de mies découpés parallèlement au sens de la levée au four. La force maximale moyenne (Fmax) de compression des mies la plus basse est notée pour le blé tendre (7,56 ± 2,39) N. Ces forces maximales de compression sont significativement inversement proportionnelles aux taux d'HPMC (r = 0,86) (Figure 88). Les couples HPMC-Hydratation avec les plus bas niveaux d'HPMC (0,33%) seraient ceux qui donnent les mies de PSG les plus dures contre les mies les plus molles aux taux élevés d'HPMC (3,32%) dans les domaines optima, se rapprochant ainsi du niveau de souplesse et de compacité de celles de blé tendre. Pour un même taux d'HPMC (cas du 2,78 %), l'accroissement du niveau d'eau (de 92,73 à 93,18%), diminue significativement la force maximale de compression aux fortes déformations (70%), traduisant l'effet plastifiant de l'eau dans la pâte (LASSOUED 2005).

En conclusion, l'utilisation du test de compression-relaxation des mies aux fortes déformations (70%) a permis de caractériser les propriétés mécaniques des PSG à l'intérieur des domaines optima. Les taux d'HPMC sont inversement proportionnels aux Fmax de compression des mies. Les couples HPMC-Hydratation avec les plus bas niveaux d'HPMC (0,33%) seraient ceux qui donnent les mies de PSG les plus dures contre les mies les plus molles aux taux élevés d'HPMC (3,32%) se rapprochant ainsi du niveau de souplesse et de compacité de celles de blé tendre.

II.5.4.4. Caractérisation sensorielle des pains

Le test de classification par rang de *Friedman* a permis la classification des PSG issus des domaines optima par rapport à chaque descripteur. Cette classification est représentée sur la figure 89. Les descripteurs testés sont la couleur, la fermeté, l'effritement, la cohésion, la viscosité, la mâchabilité et l'odeur des pains.

Le calcul de la statistique *F* de *Friedman* pour chaque descripteur montre une différence significative entre les couples HPMC-Hydratation testés y compris le témoin de blé tendre ($p < 0,001$) sauf pour la couleur. Les différences entre les PSG et le témoin de blé tendre semblent plus importantes pour la mâchabilité, la cohésion et l'effritement que pour le reste des descripteurs.

→ Les couples HPMC-Hydratation [3,32-90,47] % et [2,78-92,73] % sont ceux qui se rapprochent le plus du témoin de blé tendre quant à la fermeté, l'effritement, la viscosité, la mâchabilité et l'odeur. Par ailleurs, le reste des couples testés ([2,78-93,18], [1,93-92,66], [0,82-92,80], [0,33-93,48]) %, sont plus odorants, plus difficiles à mâcher, de viscosité, cohésion et fermeté plus élevés tout en s'effritant moins que le témoin de blé tendre.

La prise en considération de ces descripteurs classent les couples HPMC-Hydratation [3,32-90,47]% et [2,78-92,73] % comme étant les plus proches du témoin de blé tendre. Ces résultats vont dans le même sens que les préférences des panélistes qui, en plus de cette classification par rang ont exprimés leurs préférences pour le couple HPMC-Hydration [3,32-90,47] % le répertoriant en première position après le témoin de blé tendre suivi de celui de [2,78-92,73] %.

En conclusion, le test de classification par rang de Friedman a permis la classification des PSG et du blé tendre par rapport aux descripteurs choisis. Les couples HPMC-Hydratation [3,32-90,47] % et [2,78-92,73] % sont ceux qui qui se rapprochent le plus du témoin de blé tendre quant à la fermeté, l'effritement, la viscosité, la mâchabilité et l'odeur. Les panélistes ont exprimés leurs préférences pour le couple HPMC-Hydration [3,32-90,47]% le répertoriant en première position après le témoin de blé tendre suivi de celui de [2,78-92,73] %.

Conclusions

Les caractéristiques rhéologiques intéressantes présentées par la FRF au travers des tests alvéographiques ont favorisé son choix par rapport aux FRC et FRP pour être testée en panification dans cette étude. Le plan d'expérience basé sur les niveaux d'HPMC-Hydratation et sur les paramètres rhéologiques des pâtes (G', G", tan δ, IR et Eapp) a permis d'apprécier les propriétés rhéologiques des PSG et de les situer par rapport au témoin de blé tendre. Malgré l'éloignement important de G' par rapport au témoin, la FRF a pu s'en rapprocher en qualité par le rapport G"/G', montrant que les caractères visqueux et élastiques sont interdépendants et complémentaires. Il semble suffire donc d'avoir des pâtes deux fois plus élastiques que visqueuses pour garantir des aptitudes d'expansion et de rétention gazeuses intéressantes. L'optimisation a permis de délimiter deux domaines optima de couples [HPMC-Hydratation] assurant des caractéristiques rhéologiques identiques à celles de la farine témoin de blé tendre :

- **Domaine I** : [92,18-93,20] Eau et [0,25-3,12] HPMC,
- **Domaine II** : [90,41- 90,54] Eau et [3,25-3,38] HPMC.

La microstructure des pâtes observée par MCBL a permis de distinguer pour le témoin de blé tendre, le réseau de gluten qui se présente comme une structure continue formée d'agrégats de protéines sous forme de fibres bien orientées dans lesquelles s'enchâssent des formes ovoïdes à lenticulaires pouvant correspondre à des grains d'amidon. Aucun réseau protéique orienté n'est observé pour la FRF à différents taux d'HPMC. Pour des pâtes exemptes de cet épaississant, on a pu noter l'absence totale de bulles d'air. A l'intérieur des domaines optima, le volume des bulles d'air incorporé au cours du pétrissage suit une loi polynomiale avec les niveaux d'HPMC incorporés (r=0,99) pour atteindre un maximum vers les valeurs de 3,32%.

A l'Alvéographe Chopin, c'est le couple [3,32-90,47]% du domaine optimum II qui présente les meilleures caractéristiques alvéographiques tout en restant inférieures aux valeurs du témoin de blé tendre ainsi qu'aux normes algériennes et françaises de panification. Sur le plan viscoélastique, tous les points choisis des deux domaines optima expriment deux fois plus d'élasticité que de viscosité comme le témoin de blé tendre confirmant la validité des résultats de l'optimisation de la FRF.

La technique du suivi des cinétiques de fermentation par congélation et lyophilisation des pâtons donne des résultats équivalents à ceux obtenus au mesureur de pousse. Par ailleurs, au niveau suivi de la structure, une amélioration serait nécessaire. Les taux d'expansion les plus bas ont été notés pour le riz. Une amélioration du niveau d'expansion est observée pour la FRF tout en restant inférieure à celui des pâtes de fèverole. Pour les couples [HPMC-Hydratation] issus des domaines optima, l'optimum de fermentation noté aux alentours de 45 min contre 90 min pour le témoin de blé tendre.

Les Pains Sans Gluten (PSG) de la FRF perdent significativement plus d'eau ($p<0,0001$) que le témoin de blé tendre au cours du processus de panification incluant les étapes de fermentation et de cuisson. Les pains de blé tendre s'expansent significativement plus que ceux des PSG. Pour ces derniers, ce sont ceux qui perdent le plus d'eau qui s'expansent le moins.

Les Volumes spécifiques (Vsp) des PSG de la FRF issus des domaines optima sont significativement proportionnels aux taux d'HPMC ($r = 0,95$) tout en restant inférieurs à celui du témoin ($p < 0,0001$). L'échantillon de PSG qui a donné le VSP le plus proche du témoin de blé tendre ($3,31 \pm 0,07$ cm^3/g) correspond au couple HPMC-Hydratation [2,78-93,18] avec $2,89 \pm 0,07$ cm^3/g suivi de [3,32-90,47] avec $2,81 \pm 0,04$ cm^3/g. Le grain de mie des PSG reste, par ailleurs, légèrement plus grossier que celui du témoin de blé tendre.

La classification des PSG de la FRF issus des domaines optima basée sur les opérations de morphologie mathématique faite par analyse d'image a permis la discrimination de ces pains par rapport à leurs Vsp et grain de mie. Alors que les pains les plus légers (témoin, [2,78-93,18]% et [3,32-90,47]%) se placent à droite de la carte par rapport à CP1, les plus hétérogènes avec une distribution multimodale de la taille des cellules gazeuses des mies se trouvent en bas de la carte ([1,93-92,66]%, [2,78-92,73]% et [3,32-90,47]%) par rapport à CP2.

La facilité de compressibilité des mies est proportionnelle aux taux d'HPMC des couples [HPMC-Hydratation]. Le couple [0,33-92,85]% correspondant au plus bas niveau d'HPMC étudié des domaines optima serait celui qui donne les mies des PSG les plus dures contre les plus molles aux taux élevés d'HPMC [3,32-90,47]% se rapprochant ainsi du niveau de souplesse et de compacité de celles du témoin de blé tendre.

L'analyse sensorielle a révélé que les couples [3,32-90,47]% et [2,78-92,73]% étaient ceux qui se rapprochaient le plus du témoin de blé tendre quant à la fermeté, l'effritement, laviscosité, la mâchabilité et l'odeur. Les dégustateurs ont exprimé leurs préférences pour le couple HPMC-Hydration [3,32-90,47]% le classant en première position après le témoin de blé tendre suivi de celui de [2,78-92,73] %, appuyant ainsi le test de classification par rang.

Références bibliographiques

ADDO, K. and POMERANZ, Y. 1980. Lipid binding and fatty acid distribution in flour dough and baked and steamed bread. *Cereal Chemistry,* **68**, 570-572.

AGUILERA, J.M. AND STANLEY, D.W. 1999. Microstructural principles of food processing and engineering. Aspen Publishers, Maryland., *2nd Edn* : 19-22.
and gas retention in wheat bread dough. *Journal of Cereal Science,* **21** : 215-230.

ANONYME 1995. Contrôle de la qualité des produits alimentaires. *Recueil des normes françaises,* 5ème édition, AFNOR, Paris : 400 p.

ATTENBURROW, G. E., GOODBAND, R. M., TAYLOR, L. J. and LILLFORD, P. J. 1989. Structure, mechanics and texture of a food sponge. *Journal of Cereal Science,* **9**, 1989 : 61-70.

AUTIO, K., PARKKONEN, T. and FABRITIUS, M. 1997. Observing structural differences in wheat and rye breads. *Cereal Foods World,* **42** : 702-705.

AUTIO, K. and SALMENKALLIO-MARTTILA, M. 2001. Light microscopic investigations of cereal grains, doughs and breads. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technology,* **34** : 18-22.

BAARDSETH, P., KVAAL, K., LEA, P., ELLEKJÆR, M. R. and FÆRGESTAD, E. M. 2000. The effects of bread making process and wheat quality on French baguettes. *Journal of Cereal Science,* **32**, 2000 : 73-87.

BÀRCENAS, M. E. and ROSELL, C. M. 2005. Different approaches for improving the quality and extending the shelf life of the partially baked bread : low temperatures and HPMC addition. Journal of Food Engineering, **27** : 92-99.

BELL, D. A. 1990. Methylcellulose as a structure enhancer in bread baking. *Cereal Food World,* **35** : 1001-1006.

BELTON, P. S. 1999. On the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science,* **29** : 103 - 107

BERLAND, S. 1993. Etude rhéologique et calorimétrique de l'influence de traitements de congélation-décongélation sur les propriétés des pâtes de farine de blé. Répercussions en technologie boulangère. *Thèse de doctorat.* ENSIA, France, : 141p.

BERLAND, S. and LAUNAY, B. 1995. Shear softening and thixotropic properties of wheat flour doughs in dynamic testing at high shear strain. *Rheologica Acta,* 34, 622-628.

BLOKSMA, A. H. 1990a; Rheology of the breadmaking process. *Cereal Foods World,* **35** : 228-236.

BLOKSMA, A. H. 1990b. Dough structure, dough rheology, and baking quality. *Cereal Foods World,* **35** : 237-244.

BLOKSMA, A. H. 1980. Effect of heating rate on viscosity of wheat flour doughs. *Journal of Texture Studies,* **10** : 261-269.

BLOKSMA, A.H. and BUSHUK, W. 1988. Rheology and chemistry of dough. In: *Wheat chemistry and technology,* A. a. o. c. Chemists, ed., Pameranz, Y. ed., MN, 131-218.

BORNET, F.R., FONTVIEILLE, A.M., RIZKALLA, S., COLONNA, P., BLAYO, A., MERCIER, C. and SLAMA, G. 1989. Insulin and glycemic responses in healthy humans to native starches processed in different ways: correlation with in vitro alpha-amylase hydrolysis. *Am J Clin Nutr,* **50** : 315-323.

BOULTER, D. and CROY, R. R. D. 1997. The structure and biosynthesis of legume seed storage proteins : A biological solution to the storage of nitrogen in seeds. Advances in Botanical Research, **27** : 1-84.

BROOKER, B.E. 1996. The role of fat in the stabilisation of gas cells in bread dough. *Journal of Cereal Science,* **24** : 187-198.

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

BURE, J. 1985. La meunerie et les industries de cuisson *In* : Les industries agricoles et alimentaires. SCRIBAN R. *Tec Et Doc. lAVOISIER,* Paris : 169-193.

CASEY, R., DOMONEY, C. and SMITH, A. M. 1993. Biochemistry and molecular biology

of seed products. *In* : Casey R, Davies DR, eds. Peas: genetics, molecular biology and biotechnology. Wallingford: CAB International : 121-63.

CERMAV/CNRS/INRA. L'amidothèque, 2007 : www.cermav.cnrs.fr

CHARGELEGUE, A., GUINET, R., NEYRENEUF, O., ONNO, B. and POITRENAUD, B ; 1994. La fermentation, In: *La panification française,* Vol. 528. Guinet, R. and Godon, B. eds., Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris, 1994 : 283-325.

CHATRAEI, S.H., MACOSKO, C.W. and WINTER, H.H. 1981. Lubricated squeezing flow: a new biaxial extensional rheometer. *Journal of Rheology,* 25, 433-443.

CHRISTIANSON, D. D., HODGE, J. E., OSBORNE, D., and DETROY, R. W. 1981 Gelatinization of wheat starch as modified by xanthan gum, guar gum and cellulose gum.*Cereal Chemistry,* 58 : 513-517.

CHUNG, O. K. and TSEN, C. C. 1975. Distribution of lipids in acid soluble protein components as affected by dough-mixing and surfactants. *Cereal. Chem.* **52** : 823-832.

COLLAR, C., ANDREU, P., MARTÍNEZ, J. C. and ARMERO, E. 1999. Optimization of hydrocolloid addition to improve wheat bread dough functionality : a response surface methodology study. *Food Hydrocolloids,* **13** : 467-475.

COLLAR, C., ARMERO, E. and MARTÍNEZ, J. C. 1998. Lipid binding of formula bread doughs. Relationships with dough and bread technological performance.*Zeitschrift für lebensmittel Untersuchung und Forschung,* **207**: 110-121.

COLLAR, C., MARTÍNEZ, J. C. and ROSELL, C. M. 2001. Lipid binding of fresh and stored formulated wheat breads. Relashionships with dough and bread technological performance. *Food Science and Technology International,* **7**, 501-510.

CORNEC, M., POPINEAU, Y. and LEFEBVRE, J. 1994. Characterisation of gluten subfractions by SE-HPLC and dynamic rheological analysis in shear. *Journal of Cereal Science,* **19** : 131 -139.

COURTIN, C. M., ROELANTS, A and DELCOUR, J. A. 1999. Fractionation–reconstitution experiments provide insight into the role of endoxylanases in breadmaking. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* **47** : 1870 – 1877.

CREVIEU, I., BEROT, S. and GUEGUEN, J. **1996.** Large scale procedure for fractionation of albumins and globulins from pea seeds. *Nahrung,* **40** : 237-244.

CREVIEU, I., CARRE, B., CHAGNEAU, A. M., QUILLIEN, L., GUEGUEN, J. and BEROT, S. 1997. Identification of resistant pea protein in the digestive tract of chickens. *J. Agric. Food Chem.* **45** : 1295-1300.

CUQ, J. L. et LEYNAUD-ROUAUD, C. Les graines de légumineuses *In :* **DUPIN, H., CUQ, J. L., MALEWIAK, M. L., LEYNAUD-ROUAUD, C. et BERTHIER, A. M. 1992.** Alimentation et nutrition humaines. *ESF éditeurs*, Paris, 1992 : 941-61.

DAIROU, V. and SIEFFERMANN, J. M. 2002. A comparison of 14 jams characterized by conventional profile and a quick original method, the flash profile. *Journal of Food Science,* **67** : 826-834.

DANZART, M. 1998. Statistique dans l'évaluation sensorielle. Manuel méthodologique, *Lavoisier Tec et Doc,* Paris : 216-317

DAVIES, A.P. 1986. Protein Functionality in Bakery Products. In: *Chemistry and Physics of Baking. Materials, processes and products*. Blanshard, J.M.V., Frazier, P.J. and Galliard, T.(eds). Royal Society of Chemistry, Londres : 89-104.

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.), Rouen, France, **85** : 16 p.

DELARUE, J. and SIEFFERMANN, J.M. 2004. Sensory mapping using Flash profile. Comparison with a conventional descriptive method for the evaluation of the flavour of fruit dairy products. *Food Quality and Preference*, **15** : 383-392.

DELLA VALLE, G., COLONNA, P., PATRIA, A. and VERGNES, B. 1996. Influence of amylose content on the viscous behaviour of low hydrated molten starches. *J. Rheol*. **40** : 347-362.

DEVAUX, M. F., REGUERRE, A. L., CHIRON, H. et LASSOUED, N. 2005. Caractérisation par analyse d'image de produits céréaliers alvéolaires selon leur texture visuelle. *Cah. Tech. I.N.R.A.*, **56** : 17-32.

DOBRASZCZYK, B. J. and MORGENSTERN, M. P. 2003. Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, **38** : 229-245.

DOBRASZCZYK, B. J. and ROBERTS, C. A. 1994. Strain hardening and dough gas cell-wall failure in biaxial extension. J. Cereal Sci. 20:265-274.

DUBREIL, L., BISWAS, S.C. AND MARION, D. 2002. Localization of puroindoline-a and lipids in bread dough using confocal scanning laser microscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **50** : 6078-6085.

DUPRAT, F., GALLANT, D., GUILBOT, A., MERCIER, C. et ROBIN J. P. 1980. *L'amidon. In*: Les polymères végétaux. Ed. Gauthier B.M. Villars, Bordas : 176-231.

DÜRRENBERGER, B. M., HANDSCHIN, S., CONDE-PETIT, B. and ESCHER, F. 2001. Visualization of food structure by confocal laser scanning microscopy (CLSM). *Lebensm. Wiss. Technol*, **34** : 11-17.

DUS, S.J. and KOKINI, J.L. 1990. Prediction of the nonlinear viscoelastic properties of hard wheat flour dough using the Bird-Carreau constitutive model. J*ournal of Rheology*, **34**, :1069- 1084.

DZIEZAK, J. D. 1991. Afocus on gums. *Food Technology*, **45** : 115 -132.

ELIAS, E., M. 1995. *Durum wheat products, In* ***DI FONZO, N., KAAN, F., AND NACHIT, M.*** *Durum wheat quality in the Mediterranean region,* Options méditérranéennes, série A : séminaires méditérranéens, Zaragoza 17-19 novembre 1993, **22**, CIHEAM/ICARDA/CIMMYT, Zaragoza : 23-31 (284 p.).

ELIASSON, A. C. and LARSSON, K. 1993. Cereals in breadmaking. A molecular colloidal approach. New York, NY : Marcel Dekker : 371 p.

EWART, J. A. D. 1968. A hypothesis for the structure and rheology of glutenin. J. Sci. Food Agric. 19:617-623

EWART, J. A. D. 1972. A modified hypothesis for the structure and rheology of glutelins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **23** : 687 – 699.

EWART, J. A. D. 1977. Re-examination of the linear glutenin hypothesis. J. Sci. Food Agric. 28:191-199.

EWART, J. A. D. 1979. Glutenin structure. J. Sci. Food Agric. 30:482-492.

FERRASSON, E., QUILLIEN, L. and GUEGUEN, J. 1997. Proteinase Inhibitor from Pea Seeds : Purification and Characterization. *J. Agric. Food Chem.* **45** : 127-131.

FEILLET, P. 1984. The biochemical basis of pasta cooking quality. Its consequences for durum wheat breeders. *Sci. Aliments*, **4** : 555-566.

FOUCART, T. 1982. Analyse factorielle. Programmation sur micro-ordinateur. Editions MASSON, Paris 243p.

GALLAGHER, E., GORMLEY, T. R., and ARENDT, E. K. 2003. Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *J. Food Eng*, **56** : 153-161.

GAMBARO, A., VARELA, P., GIMENEZ, A., ALDROVANDI, A., FISZMAN, S. M. and Hough, G. 2002. Textural quality of white pan bread by sensory and instrumental measurement, Journal of Texture Studies, **33** : 401-413

GAN, Z., ELLIS, P. R. and SCHOFIELD, J. D. 1995. Mini review : Gas cell stabilisation

GOESAERT, H., BRIJS, K., VERAVERBEKE, W. S., COURTIN, C. M., GEBRUERS, K. and DELCOUR, J. A. 2005. Wheat flour constituent : how they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in Food Science & Technology,* **16** : 12-30.

GOUPY, J. 1999. Plans d'expériences pour surfaces de réponses. Dunod, paris : 409 p.

GUARDA, A., ROSELL, C. M., BENEDITO, C and GALOTTO, M. J. 2004. Different hydrocolloids as bread improvers and antistalting agents. *Food Hydrocolloids,* 18: 241-247.

GUEGUEN, J. and CERLETTI, P. 1994. Legume seeds proteins. *In* "New and developing sources of food proteins". Ed. B.J.F. Hudson. Chapman §Hall , London, **6** : 145-193.

GUINET, R. et GODON, B. 1994. La panification française. Eds., Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris : 534 p.

HAQUE, A., RICHARDSON, R. K., MORRIS, E. R., GIDLEY, M. J. and CASWELL, D. C. 1993. Thermogelation of methylcellulose. Part II : Effect of hydroxypropyl substituent. *Carbohydrate Polymers,* **22** : 175-186.

HAYMAN, A., HOSENEY, R.C. and FAUBION, J.M. 1998. Effect of pressure (crust formation) on bread crumb grain development. *Cereal Chemistry,* 75, 581-584.

HAYMAN, A., SIPES, K., HOSENEY, R.C. and FAUBION, J.M. 1998. Factors controlling gas cell failure in bread dough. *Cereal Chemistry,* **75** : 585-589.

HE, H. and HOSENEY, R. C. 1992. Factor controlling gas retention in nonheated doughs. *Cereal Chemistry,* **69** : 1-6.

HOSNEY, R. C. 1994. Principles of cereal science and technology. 2nd ed. St Paul, MN : Association of Cereal Chemists, Inc: 81 -101 ; 229 – 273.

HUEBNER, F.R., BIETZ, J.A., WEBB, B.D. and JULIANO, B.O. 1990. Rice cultivar identification by high-perfornance liquid chromatography of endosperm proteins. *Cereal Chem.*, 67 : 129-135.

HUG-ITEN, S., HANDSCHIN, S., CONDE-PETIT, B. AND ESCHER, F. 1999. Changes in starch microstructure on baking and staling of wheat bread. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technology,* **32** : 255-260.

J.O.R.A. 1991. *Décret executif N° 91/572 du 31 décembre* relatif à la farine de panification au pain.

JELAKA, S. L. and HLYNKA, I. **1971.** Water binding capacity of wheat flour crude pentosans and their relation to mixing characteristics of dough. *Cereal Chemistry,* **48** : 211-222.

JELAKA, S. L. and HLYNKA, I. **1972.** Effect of wheat-flour pentosans in dough, gluten and bread. *Cereal Chemistry,* **49** : 489-495.

JULIANO, B. O. 1994. Le riz dans la nutrition humaine. Collection FAO : Alimentation et nutrition N° 26, IRRI (Institut International de Recherche sur le Riz), FAO, Rome : 180 p.

JUNGE, R.C. and HOSENEY, R.C. 1981. A mechanism by which shortening and certin surfactants improve loaf volume in bread. *Cereal Chemistry,* **58** : 408-412.

KALICHEVSKY, M.T. AND RING, S.G. 1987. Incompatibility of amylose and amylopectin in aqueous solution. *Carbohydrate Research,* **162** : 323-328.

KAMMAN, P.W. 1970. Factors affecting the grain and texture of white bread. *The Bakers Digest,* **44** : 34-38.

KEETELS, C. J. A. M., VISSER, K. A., VAN VLIET, T., JURGENS, A. and WALSTRA, P. Structure and mechanics of starch bread. *Journal of Cereal Science*, **24**, 1996 : 15-26.

KHATKAR, B. S. BELL, A. E. and SCHOFIELD, J. D. 1995. The dynamic rheological properties of gluten and gluten sub-fractions from wheats of good and poor breadmaking quality. *Journal of Cereal Science*, **22** : 29-44.

KOBILAÑSKI, J. R., PÉREZ, O. E., and PILOSOF, A. M. R. 2004. Thermal transitions of gluten-free doughs as affected by water, egg white and hydroxypropylmethylcellulose. *Thermochimica Acta, 411*, 81–89

KULP, K. 1968. Pentosans of wheat endosperm. *Cereal Science Today*, **13** : 414-426.

KULP, K. and BECHTEL, W. G. **1963.** Effect of water-insoluble pentosan fraction of wheat endosperm on the quality of white bread, 68 p.

LARSSON, H. and ELIASSON, A. C. 1997. Influence of the starch granule surface on the rheological behaviour of wheat flour dough. *Journal of Texture Studies*, **28** : 487-501.

LASSOUED, N. 2005. Structure alvéolaire des produits céréaliers de cuisson en lien avec les propriétés rhéologiques et thermiques de la pâte : Effet de la composition. *Thèse de doctorat.* ENSIA, France : 163p.

LAUNAY, B. and BARTOLUCCI, J.C. 1997. Comportement rhéologique des pâtes et des produits finis. In: *Guide pratique d'analyses dans les industries des céréales*, Vol. 819, Godon, B. and Loisel, W. eds., Lavoisier-Apria, Tec et Doc, Paris, 122-174.

LAUNAY, B. and MICHON, C. 2008. Biaxial extension of wheat flour dough: lubricated squeezing flow and stress relaxation properties. *Journal of Texture Studies*, **39**, 496-529.

LEVINE, H. and SLADE, L. 1990. Cryostabilization technology: thermoanalytical evaluation of food ingredients and systems. In: *Thermal analysis of food*, Harwalkar, V. R. and Ma, C. Y., eds., Elsevier science publishers LTD, USA, 221-305.

LI, W., DOBRASZCZYK, B.J. AND WILDE, P.J. 2004. Surface properties and locations of gluten proteins and lipids revealed using confocal scanning laser microscopy in bread dough. *Journal of Cereal Science*, **39** : 403-411.

LICHTMAN, J. 1994. La microscopie confocale. *Pour la science*, **204** : 62-67.

LOSTIE, M., PECZALSKI, R., ANDRIEU, J. and LAURENT, M. 2002. Study of sponge cake batter baking process. Part I: Experimental data. *Journal of Food Engineering*, 51, 131-137.

MAC RITCHIE, F. 1983. The role of lipids in baking *In :* Lipids in Cereal Technology. P.J. BARNES academic edition : 165-88.

MAC RITCHIE, F. and GRAS, P.W. 1973. The role of flour lipids in baking. *Cereal Chemistry*, 50, 292-302.

MACOSKO, C.W. 1994. Lubricated compression. In: *Rheology, Principles, measurements, and applications.* VCH Publishers, U.S.A, 297-303.

MARION, D., DUBREIL, L. and DOULIEZ, J.P. 2003. Functionality of lipids and lipid-protein interactions in cereal-derived food products. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, **10** : 47-56.

MARTÍNEZ-ANAYA, M. A. and JIMÉNEZ, T. 1997. Functionality of enzymes that hydrolyse starch and non-starch polysaccharide in breadmaking. *Zeitschrift fur lebensmittel- Untersuchung und6Forschung*, **205** : 209 – 214.

MATSOUKA, N. P. and MORRISON, W. R. 1991. Breadmaking quality of 10 Greek bread wheats : 2. Relationships of protein, lipid and starch components to baking quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **55** : 87-101.

MC CARTHY, D. F., GALLAGHER, E., GORMLEY, T. R., SCHOBER, T. J., and ARENDT, E. K. 2005. Application of Response Surface Methodology. *Cereal Chem*, **82** : 609-615.

METTLER, E. and SEIBEL, W. 1993. Effects of emulsifiers and hydrocolloids on whole wheat bread quality : A response surface methodology study. *Cereal Chem,* **70(4)** :373-377.

METTELER, E. and SEIBEL, W. 1995. Optimizing of rye breas recipes containing mono-diglyceride, guar gum, and carboxymethyl cellulose using a maturographe and an oven rise recorder. *Cereal Chemistry*, **72** : 109-115.

MI Y. K., HYUN M. S. et HAE C. C. 1997a Varietal variation in gelatinisation and adaptability to rice bread processing and their interrelation, Korean Journal of Crop Science, **42**, 344-351

MI Y. K., YEONG H. C. et HAE C. C. 1997b. Interrelation between physicochemical properties of milled rice and retrogradation of rice bread during cold storage, Journal of the Korean Society of Food science and Nutrition, 1997 (b), **26**, 886-891

MI Y. K., YEONG H. C. et HAE C. C. 1997c. Effects of gums, fats and glutens adding on the processing quality of milled rice bread, Journal of the Korean Society of Food science and Nutrition, 1997 (c), **29**, 700-704

MICHNIEWICZ, J., BILIADERIS, C. G. and BUSHUK, W. 1991. Effect of added pentosans on some physical and technological characteristics of dough gluten. *Cereal Chemistry*, **68** : 252-258.

MOORE, M. M., HEINBOCKEL, M., DOCKERY, P., ULMER, H. M. and ARENDT, E. K. 2006. Network Formation in Gluten-Free Bread with Application of Transglutaminase. *Cereal. Chem.*, **83** : 28-36.

MOORE, W.R. and HOSENEY, R.C. 1985. The leavening of bread dough. *Cereal Foods World*, 30, 791-792.

MOORE, M. M., SCHOBER, T. J., DOCKERY, P. and ARENDT, E. K. 2004. Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads. *Cereal. Chem.*, **81** : 567-575.

MORRIS, V.J. 1990. Starch gelation and retrogradation. *Trends in Food Science and Technology*, 7, 2-6.

MULLER, H.G., WILLIAMS, M.V., RUSSEL EGGITT, P.W. and COPPOCK, J.B.M. 1961. Fundamental studies on dough with the Brabender Extensograph. I. Determination of stress strain curves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 7, 513-523.

MULVIHILL, D.M. and DONOVAN, M. 1987. Whey proteins and their thermal denaturation – a review. *Irish Journal of Food Science and Technology*, 11, 43-75.

NAEGA, S. 2005. Wheat and flour testing methods : A guide to understanding wheat and flour quality. Published by *"Wheat Marketing Center, Inc"*. Portland, Oregon, USA, 2005 : 71 p.

NAITO, S., ISHIDA, N., TAKANO, H., KOIZUMI, M. and KANO, H. 2003. Routine evaluation of the grain structures of baked breads by MRI. *Food Science and Technology Research*, **9** : 155-161.

NIEDDU, M., BLIARD, C., COLONNA, P. et DE LOOZE, M. A. 1999. Biopolymères et Agromatériaux : les entreprises prennent position. *Industries Alimentaires et Agricoles* : 52-59.

NISHITA K. D., ROBERTS R. L. and BEAN M. M. 1976 Development of a yeast-leavened rice-bread formula. *Cereal. Chem.*, **53** : 626-635.

QUARMBY, A. R. and RATKOWSKY, D. A. 1988. Free-choice and odour profiling of fish spoilage: does it achieve its objective? *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **44** : 89-98.

RENZETTI, S., DAL BELLO, F. and ARENDT, E. K. 2008. Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, **48** : 33-45.

RIBOTTA, P.D., PÉREZ, G.T., LÉON, A.E. AND ANON. M.C. 2004. Effect of emulsifier and guar gum on micro structural, rheological and baking performance of frozen bread dough. *Food Hydrocolloids,* **18** : 305-313.

ROSELL, C. M., ROJAS, J. A. and BENEDITO, C. 2001. Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids,* **15** : 75-81.

ROUAU, X. 1993. Investigations into the effects of an enzyme preparation for baking on wheat dough pentosans. *Journal of Cereal Science,* **18** : 145-272.

ROUAU, X., El-HAYEK, M-L. and MOREAU, D. 1994. Effect of an enzyme preparation containing pentosanases on the bread-making quality of flours in relation to changes in pentosan properties. *Journal of Cereal Science,* **19** : 259-157.

ROUILLE, J., DELLA VALLE, G., DEVAUX, M. F., MARION, D. and DUBREIL, L. 2005. French bread loaf volume variations and digital image analysis of crumb grain changes induced by the minor components of wheat flour. *Cereal Chemistry,* **82** : 20-27.

ROUSSEL, P. 1989. Contribution à la normalisation et à la codification des essais de panification et des critères d'appréciation de la valeur boulangère. *Mémoire d'ingénieur DPE,* ENS-MIC, Paris, 1989 : 57 p.

ROUSSEL, P. and CHIRON, H. 2002. Les pains français : Evolution, qualité, production. 1ère *ed*., MAE-ERTI. (Eds), France : 200 p.

SÁNCHEZ, HD; OSELLA, CA; DE LA TORRE, MA 2002. Optimisation du pain sans gluten préparé à partir de fécule de maïs, farine de riz et l'amidon de manioc. *Journal of Food Science* **67 (1)** : 416-419.

SARKAR, N. and WALKER, L. C. 1995. Hydration-dehydration properties of methylcellulose. *Carbohydrate Polymers,* **27** : 177-185.

SCANLON, M. G. and ZGHAL, M. C. 2001. Bread properties and crumb structure. *Food Research International,* **34** : 841-864.

SCHENZ, T. W. 1995. Glass transition and product stability- An Overview.*Food Hydrocolloïds,***9** : 307-315.

SCHOFIELD, J.D., BOTTOMLEY, R.A., LEGRYS, G.A., TIMMS, M.F. and Booth, M.R. 1984. Effect of heat in wheat gluten. In: *Gluten proteins,* Graveland, A. and Moonen, J.H.E. eds., Wageningen, Pays Bas, 81-90.

SCHWARTZ, D. 1993. Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes. Flammarion Médecine Science, Paris : 306 p.

SETSER, C. S. 1996. Sensory methods. In: *Baked goods freshness,* Hebeda, R. E. and Zobel, H.F. eds., Marcel Dekker, Inc, USA : 171-187.

SHARADANANT, R. and KHAN, K. 2003. Effect of hydrophilic gums on the quality of frozen dough : II. Bread characteristics. *Cereal Chemistry,* **80**, : 733-780.

SHEWRY, P. R. 1995. Plant storage Proteins. *Biol. Rev*. **70** : 375-426.

SHEWRY, P. R. HALFORD, N. G. and TATHAM, A. S. 1992. High molecular weight subunits of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science,* **15** : 105-120.

SHEWRY, P.R., TATHAM, A.S., FORD, J., KREIS, M. and MIFLIN, B.J. 1986. The classification and Nomenclature of wheat gluten proteins : a reassessment. *Journal of Cereal Science,* 4, 97- 106.

SIEFFERMANN, J. M. 2000. Le profil flash. Un outil rapide et innovant d'évaluation sensorielle descriptive. Agoral 2000 - XIIèmes rencontres «L'innovation: de l'idée au succès»,Montpellier, France : 335-340.

SIVARAMAKRISHNAN, H. P., SENGE, B. and CHATTOPADHYAY, P. K. **2004.** Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of food engineering,* **62** : 37 -45.

SMOLARZ, A., VAN HECKE, E. and BOUVIER, J.M. 1989. Computerized image analysis and texture of extruded biscuits. *Journal of Texture Studies,* **20** : 223-234.

SOILLE, P. Morphological image analysis. Principles and applications. Springer, 2003 : 391 p.

SOMMIER, A., CHIRON, H., COLONNA, P., DELLA VALLE, G. and ROUILLÉ, J. 2005. An instrumented pilot scale oven for the study of French bread baking. *Journal of Food Engineering,* 69, 97-106.

STEFFE, J.F. 1996. Rheological Methods in Food Process Engineering. *Freeman press, Second Edition,* USA : 412 p.

TAKANO, H., ISHIDA, N., KOIZUMI, M. and KANO, H. 2002. Imaging of the fermentation process of bread dough and the grain structure of baked breads by magnetic resonance imaging. *Journal of Food Science,* **67** : 244-50.

TOUFEILI, I., DAGHER, S., SHADAREVIAN, S., NOUREDDINE, A., SARAKBI, M. and FARRAN, M. T. 1994. Formulation of gluten-free pocket –type flat breads : optimization of methylcellulose, gum Arabic, and egg albumen levels by response surface methodology. *Cereal Chemistry,* **71** : 594-601.

TOUFEILI, I., LAMBERT, I. A. and KOKINI, J.L. 2002. Effect of glass transition and crosslinking on rheological properties of gluten: development of a preliminary state diagram. *Cereal Chemistry,* **79** : 138-142.

VAN VLIET, T., JANSSEN, A.M., BLOKSMA, A.H. and WALSTRA, P. 1992. Strain hardening of dough as a requirement for gas retention. *Journal of Texture Studies,* 23, 439-460.

VERAVERBEKE, W. S. and DELCOUR, J. A. 2002. Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition,* **42** : 1179 – 208.

VIROBEN, G., BARBOT, J., MOULOUNGUI, Z. and GUEGUEN, J. 2000. Preparation and characterization of films from pea protein. *J. Agric Food Chem.,* **48** : 1064-1069.

WARD, F. M. and ANDON, S. A. 2002. Hydrocolloids as film formers, adhesives, and gelling agents for fakery and cereal products. *Cereal Food World,* **47** : 52-55.

WHITE, J. G., AMOS, W. B. and FORDHAM, M. 1987. An evaluation of confocal versus conventional imaging of biological structures by fluorescence light microscopy. *J. Cell Biol.,* **105** : 41-48.

YLIMAKI, G., HAWRYSH, Z.J., HARDIN, R.T. and THOMSON, A.B.R. 1988. Application of response surface methodology to the development of flour yeast breads objective measurements. *Journal of Food Science,* **53** : 1800-1805.

ZGHAL, M. C., SCANLON, M. G. and SAPIRSTEIN, H.D. 1999. Prediction of bread crumb density by digital image analysis. *Cereal Chemistry,* **76** : 734-742.

ZGHAL, M.C., SCANLON, M.G. and SAPIRSTEIN, H.D. 2002. Cellular structure of bread crumb and its influence on mechanical properties. *Journal of Cereal Science,* **36** : 167-176.

Production scientifique

BENATALLAH, Le., MICHON, C., ZIDOUNE, M. N., AGLI, A. and LAUNAY, B. 2006. Formulation and manufacturing of gluten free bread : technological feasibility of formula with rice supplemented with field bean. IUFOST XIIIth congress Food is Life, Nantes, France, 17-21 September 2006, *CD of proceeding.*

BENATALLAH, Le., AGLI, A. et ZIDOUNE, M. N. 2007. Prédiction de la qualité boulangère d'une formule sans gluten (Riz-Fèverole) à partir de mesures rhéologiques et optimisation par la méthodologie des surfaces de réponses. *Journées Scientifiques de Nutrition et Technologie Alimentaires- Université Mentouri de Constantine. 12-13 novembre 2007.*

BENATALLAH, Le., AGLI, A. et ZIDOUNE, M. N. 2007. Cinétiques de fermentation de pâtes diverses destinées a la panification approchées par imagerie et taux d'expansion. *Journées Scientifiques de Nutrition et Technologie Alimentaires- Université Mentouri de Constantine. 12-13 novembre 2007.*

BENATALLAH, Le., MICHON, C., AGLI, A., ZIDOUNE, M. N. et LAUNAY, B. **2008.** Caractérisation de pâtes a pain sans gluten par l'étude de leur propriétés rhéologiques et structurales. Livret des proceeding, 43ème colloque du Groupe Français de Rhéologie, "Rhéologie et thermodynamique : Les matériaux dans tous leurs états", Palaiseau, France : 20-22 octobre 2008.

CONCLUSION GENERALE
&
PERSPECTIVES

Le premier objectif de ce travail était d'estimer la prévalence de la maladie cœliaque dans quelques villes de l'Est Algérien (Jijel, Batna, Kheanchla, Guelma et Mila) puis d'approcher la diététique associée au régime sans gluten auprès des cœliaquesalgériens ainsi que de recenser et de répertorier les difficultés vécues par ceux-ci.

Sur une période de 13 ans (1990-2003), les chiffres globaux de prévalence notés au sein des villes de Jijel, Batna, Guelma, Khenchla et Mila classent l'Est algérien parmi les régions où la maladie est fréquente (0,90 ‰) *tout en restant en dessous des chiffres donnés pour l'Afrique du Nord* (1,4‰). *Ces résultats sont cependant à considérer avec prudence vu la multitude de facteurs mis en cause dans la sous estimation de cette affection. Les résultats de l'enquête alimentaire auprès des malades cœliaques montrent que la diversification de leur alimentation est très limitée malgré l'importation d'un certain nombre de produits sans gluten et l'apparition sur le marché algérien de produits locaux. L'aliment que souhaiteraient les malades cœliaques fabriquer ou trouver sur le marché reste en première position le pain, suivi du couscous puis de la galette sans gluten.*

Dans un deuxième temps, il fallait répondre aux demandes attendues des cœliaques par l'étude de l'aptitude technologique des formules à base de riz et de légumes secs dans la fabrication de couscous et de pain, les deux aliments sans gluten les plus souhaités et les plus difficiles à fabriquer selon ces malades.

Le calcul basé sur le rapport 2/1 utilisé dans ce travail montre une majoration et une amélioration dans le niveau en protéines des formules en rapport avec la présence de légumineuses dans celles-ci. C'est la formule RF qui semble offrir le plus de protéines. Concernant la FRP et la FRC, aucune différence significative dans les taux en protéines n'est notée.

L'un des diagrammes traditionnels de fabrication de couscous trouvés dans le Nord Est Algérien et testé dans ce travail montre une faisabilité technologique relativement bonne. Cette faisabilité est accompagnée par l'avantage de la supplémentation céréales-légumes secs et la possibilité d'offrir aux ménagères et aux industriels la possibilité d'augmenter la disponibilité et la diversification des produits sans gluten à la population des malades cœliaques Les CSG sont dans leur ensemble de bonne qualité, tout en restant en dessous de celle du CT. Le CRF a été classé comme le meilleur couscous après le CT de blé dur suivi du CRC puis du CRP.

La panification a été approchée dans cette étude par la Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR) et a permis avec succès l'optimisation de PSG de la formule RF en donnant les résultats les plus proches à un témoin de blé tendre. Cette approche c'est faite sur la base de paramètres rhéologiques et des niveaux HPMC-Eau. Les panélistes ont exprimés leurs préférences pour le couple HPMC-Hydration [3,32-90,47]% le répertoriant en première position après le témoin de blé tendre suivi de celui de [2,78-92,73] %.

En terme de perspectives, ce travail mériterait d'être complété par :

- L'estimation de la prévalence de la maladie cœliaque dans d'autres villes et régions aussi bien rurales qu'urbaines de l'Est Algérien en commençant par la wilaya de Constantine ;

- Le répertoriage de recettes traditionnelles que pourraient fabriquer les malades en vue d'une diversification de leur alimentation ;

- La réalisation d'essais de panification sur le reste des formules FRC et FRP et les comparer à celle de la FRF et du témoin de blé tendre en gardant la supplémentation 2/1 céréales/légumes secs ;

- L'utilisation d'autres diagrammes de fabrication de couscous sans gluten en vue d'augmenter les rendements en produits finis en utilisant le même taux de supplémentation céréales/légumes secs ;

- L'étude de la formule riz-légumes secs à différentes proportions en vue d'améliorer la faisabilité technologique en panification et dans la fabrication de couscous en particulier et globalement de produits sans gluten ;

- Le contact d'industriels en vue de l'industrialisation des produits sans gluten fabriqués et participer ainsi réellement à la diversification de l'alimentation des malades cœliaques algériens.

ANNEXES

Annexe 1 : Exemples sur quelques aliments autorisés et interdits pour un régime sans gluten **164**
Annexe 2 : Le questionnaire..... **167**
Annexe 3 : Programme informatique établi pour le traitement des données de l'enquête..... **171**
Annexe 4. Courbes de corpulence..... **172**

Annexe 1. Exemples sur quelques aliments autorisés et interdits pour un régime sans gluten (MATUCHANSKY *et al.* 2004).

ALIMENTS	AUTORISES	INTERDITS
Féculents, Farineux, Céréales	• Pommes de terre : fraîches, précuites, sous vide • Fécule de pomme de terre • Riz et ses dérivés, crème de riz, semoule de riz • Farine de pain, biscotte, biscuits, viennoiseries, pâtes, et autres spécialités **sans gluten** • Légumes sec : frais, en conserves au naturel, surgelés au naturel, farine de légumes secs (pure) • Soja et farine de soja (pure) • Chataîgnes et leurs farines (pures) • Maïs et dérivés : fécule de maïs, semoule, germe, grains • Sarrasin et farine pure, galettes pures faites maison • Millet et dérivés : semoule • Manioc et dérivés : tapioca, tapiocaline, crème de tapioca • Sorgho • Arrow root (dictame) • Igname • Patate douce • Topinambour • Fruits à pain • Quinoa	• Pommes de terre cuisinées du commerce en boite ou surgelées* • Pommes dauphines • Pommes noisettes*, frites* • Ragoût et gratin de pomme de terre* • Autres préparations à base de pomme de terre* (traiteurs, surgelés ou en conserve) • Chips*, purée en flocons* • Riz sauvage (dérivé d'avoine**) • Blé (froment) et ses dérivés : farine, gnocchis, semoule couscous, pâtes alimentaires, cannelloni, ravioli, pain ordinaire, complet au son, pains fantaisies (au lait, au raisins, aux noix, au chocolat, viennois,...), tous les produits de boulangerie, pain de mie, biscottes, pain grillé etc..., gâteaux sec sucrés, gâteaux salés (biscuits apéritif...), pâtisseries, chapelure, pain azyme, pâtes surgelées ou en boite pour tarte • Orge et ses dérivés : farine, orge perlé, orge mondé, malt • Seigle et ses dérivés : farine, pain, pain d'épice, crack-pain • Avoine** et ses dérivés : farine, bouillie, et toute autre préparation • Galette du commerce et des crêperies à base de

		• blé, riz*, millet et sarrasin* • Céréales soufflées (pétales de maïs*, riz soufflé*, muësli*, blé soufflé...) • Epeautre, kamut, triticale
Produits sucrés	• Sucre de betterave, de canne blanc et roux, fructose, caramel liquide • Miel, confiture et gelées pur fruit pur sucre • Cacao pur • Sorbet de fruits	• Sucre glace*, sucre vanillé* • Crème de marrons*, pâtes de fruits* • Dragées • Nougats • Bonbons, chewing-gum* • Poudres instantanées pour petit déjeuner* • Pâte à tartiner* • Pâte d'amande* • Autres chocolats et friandises* • Desserts glacé* • Préparations industrielles en poudre pour dessert lacté* (crème, flan, entremets) • Entremets en boite* • Autres produits sucrés*
Aide à la lecture des étiquettes (liste non exhaustive)	• Acidifiants • Agar-Agar • Alginates • Amidon (sans autre précision) • Amidon modifié • Amidon transformé • Antioxygènes • Arôme de malt • Bétacarotène • Carraghénanes • Collagène • Colorant • Conservateurs • Dextrines, dextrose • Emulsifiants • Exhausteurs de goût • Extrait de levure • Extrait de malt • Extrait d'algues • Farine de guar et de caroube Fécule de pomme de terre	• Amidon de blé • Amidon issu des céréales interdites • Acides aminés végétaux • Avoine* • Blé ou froment • Epeautre (blé ancestral) • Gélifiants non précisés • Kamut (blé ancestral) • Malt • Matières amylacées • Orge • Pain azyme (farine de blé non levée) • Polypeptides • Protéines végétales • Seigle • Triticale (hybride de blé et de seigle) • Gruau • Liant protéinique

	• Ferments lactiques • Fructose • Gélatine alimentaire • Glucose et sirop de glucose • Glutamate • Gomme arabique • Gomme de guar • Gomme de xanthane • Gomme d'accacia • Graisse animale • Graisse végétale • Inuline,lécithine • Maltodextrines • Oligofructose • Pectine • Polyols • Polydextrose • Quinoa • Sarrasin ou blé noir • Stabilisants	

Les aliments marqués par une (*) sont en général interdits sauf exceptions qui sont impérativement :
- à contrôler par une lecture détaillée des étiquettes - ou spécifiquement mentionnées sur les listes des produits du commerce autorisés (liste de l'AFDIAG, Association Française Des intolérents Au Gluten, 2, rue de Vouillé, 75015 Paris ; site www.afdiag.org , e-mail : afdiag@yahoo.fr.
(**) : les travaux concernant la tolérance de l'avoine (≅ 50 g/j) chez l'adulte son discutés en Chapitre 1

Annexe 2 : Le questionnaire

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES
INSTITUT DE LA NUTRITION, DE L'ALIMENTATION ET DES TECHNOLOGIES ALIMENTAIRES
LABORATOIRE DE NUTRITION ET TECHNOLOGIE ALIMENTAIRE

ENQUETE SUR LA MALADIE COELIAQUE

Source d'information : .....
Année Consultée : .....
N° :.....

I- IDENTIFICATION DU MALADE

Nom : .....Prénom : .....Sexe : .....
Date de naissance : ...../...../.....
Poids : .....Poids à la naissance : .....Taille : .....Taille à la naissance : .....
Adresse : .....Commune : .....Willaya : .....
Profession du père : .....Profession de la mère : .....

Q1. Niveau scolaire :
Q1a. Aucun **Q1b.** Primaire **Q1c.** Moyen **Q1d.** Secondaire **Q1e.** Universitaire

Q2. Activité sportive :
Q2a. Marche **Q2b.** Sport **Q2c.** Aucune **Q2d.** Autre

Q3. Age de détection de la maladie : .....

Q4. Moyens de détection :
Q4a. Biopsie **Q4b.** Régime d'xclusion **Q4c.** Analyses **Q4d.** Autres

Q5. Circonstances de découverte :
Q5a. Examen chez le médecin **Q5b.** Troubles gastro-intestinaux **Q5c.** Par hazard

Q6. Autres maladies :
Q6a. Aucune **Q6b.** Diabète **Q6c.** Obésité **Q6d.** Malabsorption **Q6e.** Autres

II- MERE DU MALADE (Pratique du sevrage)

Q7. Nombre d'enfants : ..... **Q8.** Filles : ..... **Q9.** Garçons : .....

Q10. Nombre d'enfants malades: ..... **Q11.** Position de l'enfant malade .....

Q12. Durée de l'allaitement :
Q12a. Maternel de.....à.....jours **Q12b.** Artificiel de.....à.....jours **Q12c.** Mixte de.....à.....jours

Q13. Age d'introduction des aliments de sevrage :.....mois

Q14. Age d'apparition des premières dents :.....mois

Q15. Age d'apparition des troubles : .....jours

Q16.

Aliments de sevrage	**Quantité introduite par jour au cours de la période de sevrage**							
Semaines de sevrage	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**

Aliments de sevrage	**Fréquence de consommation par semaine au cours de la période de sevrage**							
Semaines de sevrage	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**

Biberon de 250 ml pour les liquides, Cuillère à soupe ou cuillère à café pour les solides

Q17. Recettes de préparation d'aliments de sevrage (avec ou sans gluten)

Produits	**Ingrédients**	**Préparation**

Q18. Age d'introduction des céréales : .....mois

Aliments de sevrage	**Fréquence de consommation par jour au cours de la période de sevrage**							
Semaines de sevrage	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**

Biberon de 250 ml pour les liquides, Cuillère à soupe ou cuillère à café pour les solides

Céréales introduites	**Fréquence de consommation par semaine au cours de la période de sevrage**							
Semaines de sevrage	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**

Biberon de 250 ml pour les liquides, Cuillère à soupe ou cuillère à café pour les solides

III. Comportement du malade et diététique associée

Q19. Classement des aliments autorisés du plus préféré au moins préféré
1.....2.....3.....4.....5.....

Q20. Classement des aliments interdits du plus préféré au moins préféré
1.....2.....3.....4.....5.....

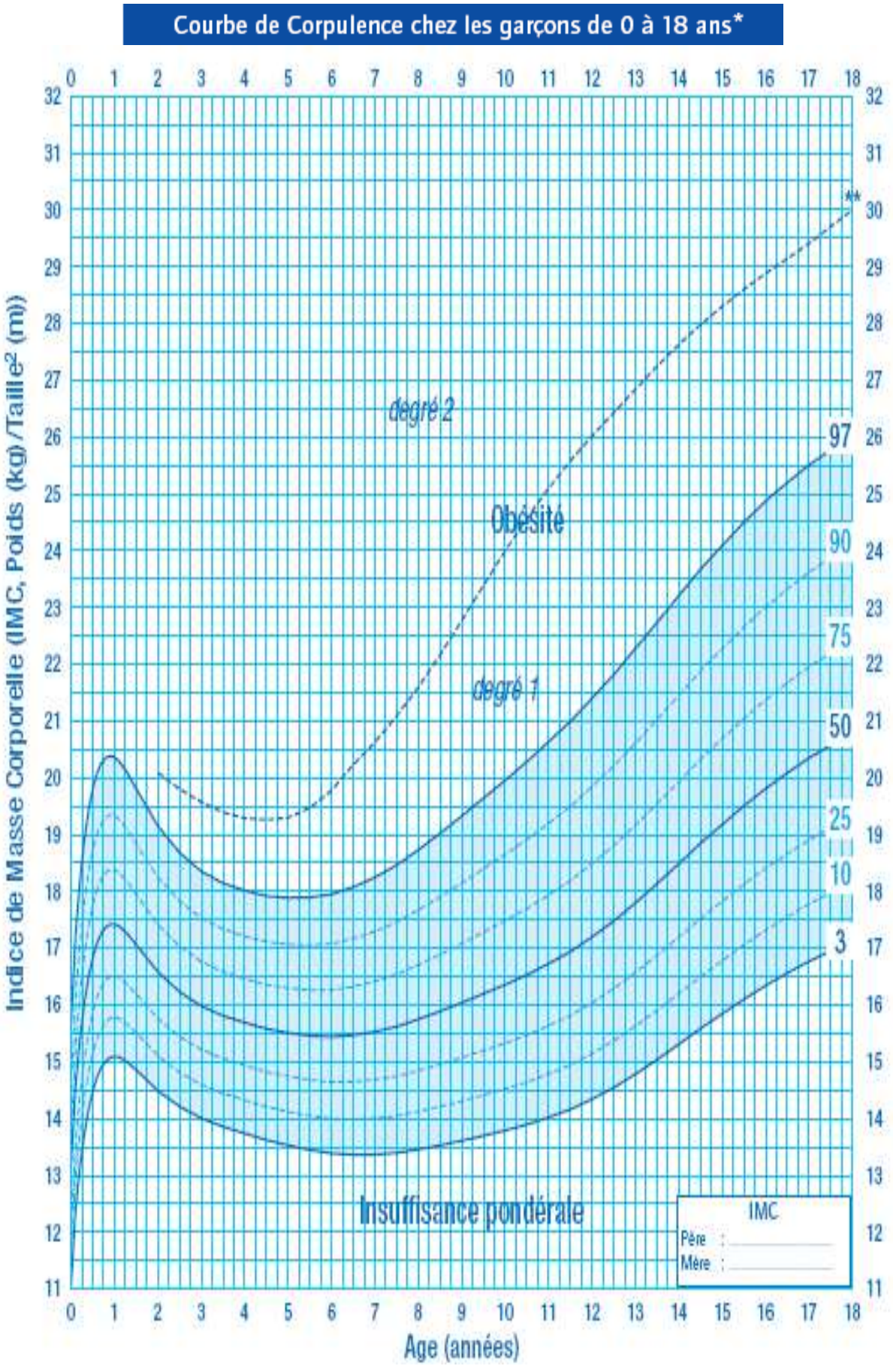
Q21. Est-ce que votre enfant malade mange en cachette des aliments interdits ? Oui Non

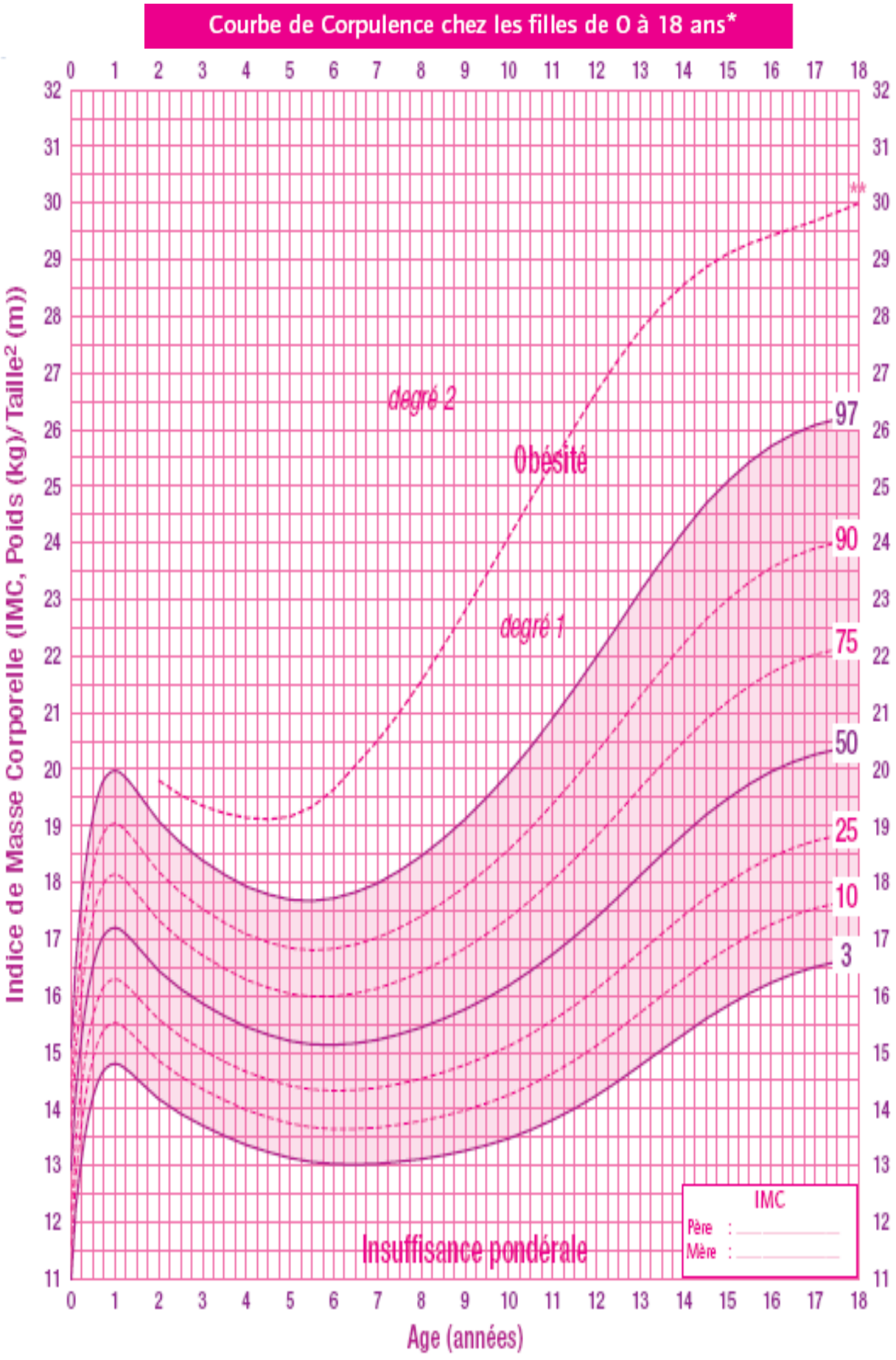
Liste des aliments	Ingrédients	Mode de préparation	Acceptation du malade	Fréquence de consommation/jour/semaine ou/mois
Fabriqués en Algérie				
Importés				
Faits maison : Courant/Fêtes/Traditionnels				
Souhaités mais difficiles à fabriquer ou non disponibles				

Annexe 3. Programme informatique établi pour le traitement des données de l'enquête

```
read c:\GUELMA\GUELMA.REC
route c:\GUELMA\GUELMA.TXT
freq AC
freq SI
freq Nom
tables Nom N
define classage <A>
if age >=0 and age <6 then classage=1
if age >=6 and age <12 then classage=2
if age >=12 and age <18 then classage=3
if age >=18 and age <24 then classage=4
if age >=24 and age <30 then classage=5
if age >=30 and age <36 then classage=6
if age >=36 and age <42 then classage=7
if age >=42 and age <48 then classage=8
if age >=48 and age <54 then classage=9
if age >=54 and age <60 then classage=10
if age >=60 and age <66 then classage=11
if age >=66 and age <72 then classage=12
freq classage
ferq sex
tables sex classage
define IMC##.##
let IMC = PA/(TA*TA)
select age >= 18
define classIMC <A>
if IMC <=18.5 then classIMC = 1
if IMC >18.5 and IMC <=25 then classIMC=2
if IMC >25 and IMC <=30 then classIMC=3
freq classIMC
tables sex classIMC
tables age classIMC
select age <18
freq IMC
tables sex IMC
tables age IMC
select
freq Q1
freq Q2a
freq Q2b
freq Q2c
freq Q2d
freq Q2e
freq Q3
freq Q4a
freq Q4b
freq Q4c
freq Q4d
freq Q4e
freq Q4f
freq Q5a
freq Q5b
freq Q5c
freq Q5d
freq Q5e
freq Q6a
freq Q6b
freq Q6c
freq Q6d
freq Q6e
tables N IMC
```

Annexe 4. Courbes de corpulence au cours de la croissance des enfants et des adolescents (ROLLAND-CACHERA *et al.* 1991)




Courbe de Corpulence chez les filles de 0 à 18 ans*
Indice de Masse Corporelle (IMC, Poids (kg)/ Taille² (m))
Age (années)
degré 2
Obésité
degré 1
Insuffisance pondérale
97
90
75
50
25
10
3
IMC
Père :
Mère :

Résumé

Le but de ce travail est d'estimer dans un premier temps la prévalence de la maladie cœliaque dans quelques villes de l'Est algérien et d'approcher la diététique associée au régime sans gluten auprès des malades puis de formuler et fabriquer deux des aliments sans gluten souhaités par ces consommateurs : le pain et le couscous.

Le dépistage a visé des malades cœliaques enfants et adultes fréquentant les services de la santé (hôpitaux, UDS, médecins privés,) au niveau des villes de Jijel, Batna, Khenchla, Guelma et Mila. Le recueil des données a porté sur une période de 13 ans (1990-2003). L'enquête auprès de la population concernée de ces villes a permis de recenser les difficultés vécues par les malades et celles rencontrées par les intervenants de la santé par rapport aux aspects diététiques à recommander pour les sujets atteints de cette affection. Une prévalence moyenne d'au moins 0,9‰ a été notée au niveau des villes étudiées ; ce qui n'est pas très loin du chiffre donné pour l'Afrique du nord (1,4‰). L'enquête a fait ressortir une défaillance dans l'alimentation de cette population et a permis de répertorier un ensemble d'aliments souhaités par les cœliaque algériens, notamment le pain et le couscous. La formulation riz (*Oryza sativa japonica*) - légumes secs associant pois chiche (*Cicer arietinum*) ou pois protéagineux (*Pisum arvense*) ou fèverole (*Vicia faba*) a été envisagée pour la fabrication de couscous sans gluten (CSG). La formule riz – fèverole (FRF) a été étudiée sur le plan rhéologique et testée pour la fabrication de pain sans gluten (PSG). Les CSG ont été fabriqués selon un mode artisanal. Les formules sont comparées à un couscous témoin de blé dur (CT). La formule riz - fèverole présente le rendement le plus proche du couscous témoin (CT). La facilité d'agrégation des ingrédients de la FRF est montrée par la présence de la plus grande fraction de gros couscous de riz-fèverole (CRF). Les CSG absorbent moins d'eau que le CT. L'analyse sensorielle place le CRF en premier lieu après le CT suivi du CRC puis du CRP. Le comportement rhéologique des pâtes est étudié pour la FRF avec ajout d'HPMC [0 à 4,5]% comme améliorant et variation du taux d'hydratation [90 à 93,75]% en élaborant un plan d'expériences central composite à deux facteurs (HPMC et Hydratation) et cinq niveaux. Les propriétés viscoélastiques (G', G" et tan δ) et mécaniques (E_{app} et IR) des pâtes sont évaluées respectivement au rhéomètre CSL^2100 et au texturomètre TA-XT*2i*. L'aptitude à fabriquer du pain sans gluten est ensuite vérifiée sur des couples HPMC-Hydratation tirés de l'optimisation des surfaces de réponses comparativement à un témoin de blé tendre. Des suivis de cinétiques de fermentation, des tests à l'Alvéographe Chopin et au CSL^2100 et des observations par MCBL ont été réalisés en vue de situer l'aptitude de la formule à la panification. Les pains sans gluten obtenus ont aussi été comparés sur la base des pertes de poids, des volumes spécifiques puis des propriétés texturales des mies et ont été classés par ACP. Ils sont enfin évalués sensoriellement et situés selon le test de classification par rang de *Friedman.* Les couples HPMC-Hydratation qui rapprochent le plus les PSG du pain témoin sont [3,32-90,47] % suivi de [2,78-93,18]%.

Mots clés : cœliaque, prévalence, formules sans gluten, rhéologie, méthodologie des surfaces de réponses, aptitude technologique, couscous, pain.

Abstract

The purpose of this work is to consider at first prevalence of the celiac disease in some east Algerian cities and to approach the dietetics associated with the diet without gluten with the patients then to formulate and to make two of the wished gluten free foods : the bread and the couscous.

The screening aimed at all the celiac patients children and adults frequenting health services (hospitals, UDS, private doctors…) at Jijel, Batna, Khenchla, Guelma and Mila cities. The data collection concerned a maximal period of 13 years (1990-2003). The survey with the concerned population in these cities allowed to list the difficulties lived by the patients and those met by the speakers of health with regard to the dietary aspects to recommend for the reached subjects by this affection. Average prevalence of at least 0,9‰ was noted on the studied cities, what is not very far from statistics given for north Africa (1,4‰). The survey highlighted a failure in the supply of this population and allowed to list a set of wished food by Algerian celiac, in particular the bread and the couscous. The formulation rice (*Oryza sativa japonica*)-leguminous associating Chickpea (*Cicer arietinum*), or Proteaginous Pea (*Pisum arvense*) or Field bean (*Vicia faba*) was used for the manufacturing of three Gluten Free Couscous (GFC). The Rice- Field bean Formula was studied on the rheological level and tested for the manufacturing of the Gluten Free Breads (GFB). The GFC were made according to a traditional home-made. The formulae were compared to a Couscous Control with gluten (CC). The RFF presents the closest productivity of the GFC. The easiness of aggregation of the RFF ingredients is shown by the presence of the highest fraction of big Couscous of Rice-Field bean (CRF). The GFC absorb less water than the CC. Their loss in dry matter remains lower than the CC and than the couscous made according to a diagram without stage of steam precooking. The sensory analysis places the RFC in the first position after the CC followed by the RCC then by the RPC. The rheological behavior of dough is studied for the RFF with HPMC addition [0-4,5]% as improving and variation of hydration rate [90-93,75]% by elaborating a central composite statistical design with two factors (HPMC and hydration) and five levels. Viscoelastics (G', G'' et tan δ) and mechanical (E_{app} et IR) properties of doughs are respectively estimated with the CSL^2100 rheometer and the TA-XT*2i* texturometer. The aptitude to make gluten free bread is then verified on HPMC-Hydration couples stemming from answers surface optimization comparatively with the control of soft wheat. The Follow-ups of fermentation kinetics, of tests in Alvéographe Chopin and in CSL^2100 and observations by MCBL were realized in order to place the aptitude of the formula in the bread-making. The obtained GFB were also compared on the base of weight losses, of specific volumes, then of the crumbs textural properties and where classified by ACP. The GFB were finally sensorially characterized by *Friedman* test rank classification. The [HPMC-Hydration] couples which move closer most the GFB to the control of soft wheat are : [3,32-90,47] % followed by [2,78-93,18]%.

Keywords : Celiac, prevalence, gluten free formulae, rheology, area response methodology, technological aptitude, couscous, bread

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقدير نسبة توقع مرض حساسية الغلوتين قي بعض مدن الشرق الجزائري و الإقتراب من التغذية الخاصة بالحمية بدون غلوتين لهؤلاء المرضى ثم صياغة و صنع غذائين بدون غلوتين من بين تلك المتمناة من قبل المستهلكين : الخبز و الكسكسي.

خص التقصي كل مرضى الحساسية للغلوتين مهما كانت أعمارهم و المترددين على مصالح الصحة المختلفة (المستشفيات، وحدات التقصي المدرسية ، الأطباء الخواص...) على مستوى مدن جيجل، باتنة، خنشلة، قالمة و ميلة. عملية جمع المعلومات خصت مدة 13 سنة (1993-2003). عملية التحقيق سمحت بإحصاء الصعوبات المعاشة من قبل المرضى في هته المدن و المواجهة من طرف متدخلي الصحة بالنسبة للجانب الغذائي المنصوح به لهؤلاء المرضى. سجل معدل نسبة توقع المرض على الأقل ب 0،9 ‰ على مستوى المدن المدروسة، الشيء الذي يجعلها غير بعيدة عن الرقم المسجل بشمال إفريقيا (1،4 ‰). أبرزت عملية التحقيق العجز الغذائي على مستوى هذه الفئة من المرضى و سمحت بجدولة جملة من الأغذية المتمناة من قبلهم خصوصا الخبز و الكسكسي. إن الصياغة رز (أوريزا ساتيفا جابونيكا)-بقول جافة متضمنة الحمص (سيسير أريبيتينوم)، أو البازيلاء البروتينية (بيسوم أرفينسي)، أو فول الحقول (فيسيا فابا)، قد إستعملت لصناعة ثلاثة أنواع من الكسكسي بدون غلوتين (CSG). درست الصياغة رز- فول الحقول (FRF) من الجانب الريولوجي و جربت لصناعة الخبز بدون غلوتين (PSG). صنعت مختلف أنواع CSG وفقا لطريقة تقليدية مع خطوة طهو أولية للدقيق الخشن ببخار الماء. قورنت الصياغات إلى شاهد بالقمح الصلب (CT). قدمت الصياغة رز- فول الحقول (FRF) أقرب إنتاجية إلى ال CT. إن سهولة تجمع مكونات ال FRF مبين بوجود أكبر نسبة من الكسكسي الخشن CRF. إن أنواع ال CSG تمتص أقل ماء مقارنة بال CT. رتب التحليل الحسي ال CRF في المرتبة الأولى بعد ال CT متبوعا بال CRC ثم بال CRP. درست الخواص الريولوجية للصياغة FRF مع إضافة الكميات الآتية من ال HPMC [0-4،5]% كمحسن و من الماء [90-93,75]% مع تطوير خطة تجارب مركبة و ممركزة ذات عاملين (HPMC و الماء) و خمسة مستويات. قيمت الخصائص المطاطية و اللزجة (G'، G" و tan δ) و كذالك الميكانيكية (IR و Eapp) للعجائن على التوالي بالريومتر CSL²100 و التيكسترومتر TA-TXT2*i*. إن قابلية صنع الخبز بدون غلوتين قد تم التأ كد من صحتها على ثنائيات [HPMC – ماء] مستخرجة من التحسين بواسطة مساحات الأجوبة و هذا بالمقارنة مع شاهد من القمح الين.

أنجزت حركيات التخمر, إختبارات ريولوجية بالألفيوغراف شوبين و بال CSL²100، كما تم تصوير العجائن بال MCBL من أجل تحديد قابلية الصياغة لصناعة الخبز. إظافة إلى ذالك، قورنت كذالك ال GPS على أساس فقدان الوزن، قياس الحجم المحدد للخبز و دراسة الخصائص التكوينية الملمسية للب الخبز بتحليل الصور ثم تم تصنيفها بال ACP. ميزت ال PSG حسيا باختبار الترتيب بالصف لفريدمان. الثنائيات [HPMC – ماء] الأقرب من الشاهد بالقمح اللين هي [32،3 – 47،90] % متبوعة ب [78،2 – 18،93] %.

الكلمات الدالة : السيلياك، صيغ بدون غلوتين، نسبة التوقع، الريولوجيا ، منهجية مساحات الأجوبة، القابلية التكنولوجية، كسكسي، خبز.