

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATRIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DELA RECHERCHE
SIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش- الجزائر
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE EL-HARRACH – ALGER

THESE

**En vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT en Sciences
Agronomiques**

THEME

**Etude et optimisation des conditions d'hydratation des semoules de blé dur
sur l'expression de la qualité technologique du couscous.
Modifications biochimiques des protéines.**

Présenté par : M^{me} DAHOUN - LEFKIR Samia

Jury :

Président :	M. BENCHABANE A.	Professeur
Directrice de thèse :	M^{me} OUNANE G.	Professeur
Examineurs :	M. NOUANI A.	Professeur
	M^{me} YAHIAOUI K.	MCA

Année universitaire : 2017-2018

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je remercie d'abord le tout puissant Dieu de m'avoir donné la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma directrice de thèse M^{me} **OUNANE G.** professeur à l'E.N.S.A. pour ses conseils, ses orientations et le suivi de ce travail du début jusqu'à la fin en dépit de ses lourdes charges.

Je remercie vivement M. **BENCHABANE A.** professeur à l'E.N.S.A. qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Mes remerciements vont aussi à M. **NOUANI A.** Professeur à UMBB et M^{me} **YAHIAOUI K.** maitre de conférences à UMBB pour avoir accepté de participer au jury.

J'exprime aussi mes sincères reconnaissances à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail.

Je ne peux omettre d'exprimer mes vives gratitude et ma grande reconnaissance à ma mère pour sa participation à la réalisation de ce travail. Je remercie aussi ma famille et mes amies pour leur apport moral.

Liste des abréviations

CNP : Couscous non précuits
CP : Couscous précuits
CS : Couscous secs
DD : Délitescence
D50 : Granulométrie médiane
G25 : Gonflement à froid
G100 : Gonflement à chaud
GI : Gluténines insolubles
GMP : Glutenin Macro Polymer
GS : Gluténines solubles
HMW : Gluténines de haut poids moléculaire
I.B : Indice de brun
IGG : Indice de gonflement des gluténines
IGG CNP : Indice de gonflement des gluténines des couscous non précuits
IGG CP : Indice de gonflement des gluténines des couscous précuits
IGG CS : Indice de gonflement des gluténines des couscous secs
IGG SEM : Indice de gonflement des gluténines des semoules
I.J : Indice de jaune
IPMT : Indice de prise en masse par tamisage
IS : Indice de solubilité
LMW : Gluténines de faible poids moléculaire
PM : Protéines monomériques
PT : Protéine totale
SC : Semoule courante
SDS : Dodécyl sulfate de sodium
SE : Semoule extra
Sg : Dispersion géométrique
SG-FPM : Sous-unités gluténines de faible poids moléculaire
SG-HPM : Sous-unités gluténines de haut poids moléculaire
SH : Liaison sulfhydryl
SN SC : Semoule native courante
SN SE : Semoule native extra
SS : Liaison disulfure
UPP : Unextractable Polymeric Protein

Liste des figures

	Pages
Figure 1 : Microstructure d'agglomérat humide après le roulage (Hebrard, 2002).....	5
Figure 2 : Microphotographies de grains secs et hydratés de semoule, d'agglomérats secs et humides, et grains de couscous et hypothèses du mécanisme de formation des grains de couscous (Cuq et Abecassis, 2006).....	6
Figure 3 : Superposition des étapes de fabrication du couscous sur le diagramme d'état des composants de blé dur (amidon & protéines) (Cuq et Abecassis, 2006).....	7
Figure 4 : Mécanisme d'agglomération de la semoule de blé dur (Saad <i>et al.</i> , 2010).....	8
Figure 5 : Modèle mécaniste qui décrit les mécanismes physiques et physico-chimiques impliqués dans l'agglomération des poudres de blé (Hafsa <i>et al.</i> , 2015).....	9
Figure 6 : SEM microstructure des particules de la semoule de blé dur (A) des grains formés après hydratation et malaxage: nucléi (B,C), des agglomérats (D,E) et des pièces de pâte (F,G) (Saad <i>et al.</i> , 2011).....	11
Figure 7 : Classification des protéines selon Osborne (1907) et Shewry <i>et al.</i> (1986).....	15
Figure 8 : Modèle "loop-and-train" proposé par Belton (1999) pour décrire la structure du gluten.....	18
Figure 9 : Digramme de fabrication des Couscous (Lefkir <i>et al.</i> , 2017).....	26
Figure 10 : Mixogramme d'un blé dur à gluten fort.....	29
Figure 11 : Fractionnement séquentiel des protéines par combinaison de la méthode de Fu et Kovacs (1999) et la méthode de Wang et Kovacs (2002).....	35
Figure 12 : Courbes granulométriques des semoules.....	41
Figure 13 : Influence du taux d'hydratation sur les rendements de l'opération de roulage.....	43
Figure 14 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur les rendements de l'opération de roulage.....	46
Figure 15 : Influence du taux d'hydratation sur la granulométrie des couscous : (A) D50 (B) Sg.....	48
Figure 16 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la granulométrie des couscous : (A) D50 (B) Sg.....	49

Figure 17 : Influence du taux d'hydratation sur la coloration des couscous : (A) Indice de brun (B) Indice de jaune.....	52
Figure 18 : Influence de la température sur la coloration : (A) Indice de brun (B) Indice de jaune.....	53
Figure 19 : Influence du taux d'hydratation sur la capacité d'hydratation des couscous : (A) Gonflement à froid (B) Gonflement à chaud.....	55
Figure 20 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la capacité d'hydratation des couscous : (A) Gonflement à froid (B) Gonflement à chaud.....	57
Figure 21 : Influence du taux d'hydratation sur l'indice de prise en masse des couscous.....	58
Figure 22 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur l'indice de prise en masse des couscous.....	59
Figure 23 : Influence du taux d'hydratation sur la délitescence.....	61
Figure 24 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la délitescence.....	62
Figure 25 : Influence du taux d'hydratation sur l'indice de solubilité	64
Figure 26 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur l'indice de solubilité.....	64
Figure 27 : Diagrammes de Pareto des réponses : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J).....	74
Figure 28 : Evolution des valeurs observées avec les valeurs prédites pour : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J).....	76
Figure 29 : Les effets principaux sur les différentes réponses : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT(C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D 50 (I), Sg (J).....	79
Figure 30 : Surfaces des réponses des facteurs significatifs sur : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J).....	81
Figure 31 : Les effets des interactions sur les différentes réponses : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J).....	84
Figure 32 : Evolution de la désirabilité en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation : semoule extra (A) semoule courante (B).....	89

Figure 33 : Influence du taux d'hydratation sur l'indice de gonflement des gluténines.....	113
Figure 34 : Influence de la température sur l'indice de gonflement des gluténines.....	113
Figure 35 : Electrophorèse des protéines des semoules et des couscous aux différents stades de fabrication en fonction du taux d'hydratation : (A) semoule extra, (B) semoule courante.....	116
Figure 36 : Electrophorèse des protéines des semoules et des couscous aux différents stades de fabrication en fonction de la température du taux d'hydratation : (A) semoule extra (B) semoule courante.....	117

Liste des tableaux

	Pages
Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques et technologiques des semoules.....	38
Tableau 2 : Test de comparaison de moyennes (test de Student) des différentes caractéristiques des semoules.....	38
Tableau 3 : Matrice des corrélations des caractéristiques physico-chimiques et technologiques des semoules.....	42
Tableau 4 : Analyse de la variance des caractéristiques des couscous à l'état sec.....	54
Tableau 5 : Analyse de la variance de la qualité culinaire des couscous.....	65
Tableau 6 : Domaine expérimental.....	67
Tableau 7 : Matrice d'expériences factorielle 2^3	68
Tableau 8 : Caractéristiques de la qualité du couscous pour les points du plan d'expérience.....	69
Tableau 9 : Résumé des caractéristiques de l'ajustement du modèle mathématique.....	70
Tableau 10 : Analyse de la variance et les coefficients de régression des réponses étudiées.....	71
Tableau 11 : Valeurs des résidus des réponses étudiées.....	75
Tableau 12 : Modèles de régression des différentes réponses étudiées traduisant l'effet des conditions d'hydratation.....	77
Tableau 13 : Valeurs optimales des réponses en fonction des valeurs optimales des facteurs.....	86
Tableau 14 : Valeurs des réponses à l'optimum en fonction de la désirabilité pour chaque réponse.....	88
Tableau 15 : Désirabilité optimisée ainsi que les valeurs des facteurs à l'optimum.....	88
Tableau 16 : Teneurs des fractions protéiques des semoules et des couscous roulés non précuits.....	94
Tableau 17 : Analyse de la variance des fractions protéiques des semoules.....	99

Tableau 18 : Analyse de la variance des fractions protéiques des couscous non précuits...	99
Tableau 19 : Teneurs des fractions protéiques des couscous précuits.....	103
Tableau 20 : Teneurs des fractions protéiques des couscous secs.....	107
Tableau 21 : Analyse de la variance des fractions protéiques des couscous précuits.....	108
Tableau 22 : Analyse de la variance des fractions protéiques des couscous secs.....	108
Tableau 23 : Analyse de la variance de l'indice de gonflement des gluténines des couscous.....	114

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
1-Couscous.....	4
1-1-Définition du couscous.....	4
1-2-Procédé de fabrication du couscous.....	4
1-3-Mécanisme d'agglomération de la semoule au cours du roulage.....	7
1-4-Qualité du couscous.....	11
2-Influence des conditions de l'hydratation sur la qualité du couscous.....	12
2-1-Influence du taux d'hydratation.....	12
2-2-Influence de la température.....	14
3-Modifications biochimiques des protéines.....	14
3-1-Les protéines.....	14
3-2-Influence de l'hydratation et du mélange sur les modifications des protéines.....	17
3-3-Influence du traitement thermique sur les modifications biochimiques des protéines...	22
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES D'ANALYSE	
1-Matériel d'étude.....	25
1-1-Préparation des couscous.....	25
2-Méthodes d'analyse.....	27
2-1-Analyses physico-chimiques.....	27
2-1-1-Dosage de l'humidité.....	27
2-1-2-Dosage des protéines.....	27
2-1-3-Taux de cendre.....	27
2-1-4-Dosage des lipides totaux.....	27
2-2-Analyse technologiques.....	27
2-2-1-Teneur en gluten sec et en gluten humide.....	27
2-2-2-Détermination de la coloration.....	28
2-2-3-Analyse granulométrique.....	28
2-2-4-Mixographe.....	29
2-3-Méthodes d'appréciation de la qualité culinaire des couscous.....	30
2-3-1-Capacité d'hydratation du couscous (gonflement).....	30
2-3-2-Prise en masse du couscous cuit.....	30
2-3-3-Degré de délitescence.....	31
2-3-4-Indice de solubilité dans l'eau.....	31

2-4-Modifications biochimiques.....	32
2-4-1-Indice de gonflement des gluténines (IGG).....	32
2-4-2-Electrophorèse des protéines en gel de polyacrylamide en présence de dodécyl sulfate de sodium (SDS-PAGE).....	32
2-4-3-Fractionnement par solubilité différentielle et dosage des différentes fractions protéiques.....	33
2-5-Optimisation des conditions d'hydratation du couscous.....	35
2-6-Méthodes statistiques.....	36

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DUSCUSSIONS

Chapitre I : Etude de la matière première.....	37
1-1-Caractéristiques des semoules.....	37
1-1-1-Teneur en protéines des semoules.....	37
1-1-2-Teneur en lipides des semoules.....	38
1-1-3-Teneur en cendres des semoules.....	39
1-1-4-Teneurs en gluten sec et en gluten humide des semoules.....	39
1-1-5-Coloration des semoules.....	40
1-1-6-Granulométrie des semoules.....	40
1-1-7-Essais au Mixographe.....	41
Chapitre II : Influence des conditions d'hydratation sur la qualité du couscous.....	43
2-1-Rendements de l'opération de roulage et facilité de roulage.....	43
2-1-1-Influence du taux d'hydratation.....	43
2-1-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur le roulage.....	45
2-1-3-Influence de la semoule sur le roulage.....	46
2-2-Caractéristique du couscous à l'état sec.....	48
2-2-1-Granulométrie du couscous.....	48
2-2-1-1-Influence du taux d'hydratation sur la granulométrie du couscous.....	48
2-2-1-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la granulométrie du couscous.....	49
2-2-1-3-Influence de la semoule sur la granulométrie du couscous.....	50
2-2-2-Coloration des couscous.....	51
2-2-2-1-Influence du taux d'hydratation sur la coloration du couscous.....	52
2-2-2-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la coloration du couscous.....	52
2-2-2-3-Influence de la semoule sur la coloration du couscous.....	53
2-3-Caractéristiques de la qualité culinaire.....	55
2-3-1-Gonflement du couscous.....	55
2-3-1-1-Influence du taux d'hydratation sur le gonflement à froid et à chaud des couscous.....	55

2-3-1-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur le gonflement à froid et à chaud des couscous.....	56
2-3-1-3- Influence de la semoule sur le gonflement à froid et à chaud des couscous.....	57
2-3-2-Prise en masse du couscous cuit.....	57
2-3-2-1-Influence du taux d'hydratation sur la prise en masse du couscous cuit.....	58
2-3-2-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la prise en masse du couscous cuit.....	59
2-3-2-3-Influence de la semoule sur la prise en masse du couscous cuit.....	60
2-3-3-Délitescence du couscous.....	60
2-3-3-1-Influence du taux d'hydratation sur la délitescence du couscous.....	60
2-3-3-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la délitescence du couscous.....	61
2-3-3-3-Influence de la semoule sur la délitescence du couscous.....	62
2-3-4-Indice de solubilité.....	63
2-3-4-1-Influence du taux d'hydratation sur l'indice de solubilité.....	63
2-3-4-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur l'indice de solubilité.....	64
2-3-4-3-Influence de la semoule sur l'indice de solubilité.....	65
Conclusion du chapitre II.....	65
CHAPITRE III : Optimisation des conditions d'hydratation.....	67
3-1-Plan d'expérience.....	67
3-2-Analyse du plan d'expérimentation.....	68
3-2-1-Modélisation.....	68
3-2-2- Validité du modèle mathématique.....	68
3-3-Influence des facteurs significatifs.....	77
3-3-1-Effets principaux.....	77
3-3-2-Effets d'interactions.....	82
3-4-Optimisation des conditions d'hydratation.....	85
Conclusion chapitre III.....	89
Chapitre IV : Influences des conditions d'hydratation sur les modifications biochimiques des protéines.....	91
4-1-Influences des conditions d'hydratation sur les différentes fractions protéiques.....	91
4-1-1-Modifications des fractions protéiques après hydratation et roulage du couscous.....	91
4-1-2-Modifications des fractions protéiques après la précuisson et le séchage des couscous.....	100
4-1-3-Relations entre les fractions protéiques et la qualité du couscous.....	108
4-1-3-1-Relations entre les fractions protéiques et le rendement du roulage.....	109
4-1-3-2- Relations entre les fractions protéiques et la qualité technologique du couscous...	111
4-2-Influences des conditions d'hydratation sur le test de gonflement des gluténines.....	112

4-3-Analyse électrophorétique.....	115
Conclusion du chapitre IV.....	118
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	120
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	122
ANNEXES.....	139

INTRODUCTION

Le couscous est fabriqué à partir de semoule de blé dur (*Triticum durum*). Les particules de cette semoule sont hydratées avec de l'eau potable pour les agglomérer. Le couscous est soumis à des traitements physiques (malaxage et roulage) et des traitements thermiques (précuisson et séchage).

L'Algérie est le leader de la production de couscous (environ 1 million de tonnes/an), constituée avant tout de productions artisanales. Dans ce pays, la consommation de couscous atteint 50kg par habitant et par an (D'Egidio et Pagani, 2010).

Un couscous de bonne qualité doit avoir une granulométrie homogène et une couleur jaune ambrée à l'état sec. Après la cuisson les particules de couscous doivent conserver leurs intégrités et absorber la sauce sans coller entre elles. La qualité du couscous dépend de la matière première mise en œuvre et des conditions de fabrication : hydratation/roulage, précuisson et séchage du couscous.

L'hydratation et le roulage est la première étape dans la fabrication du couscous. Elle correspond à la formation de grains de couscous par un processus d'agglomération humide suite aux opérations de mouillage, malaxage, roulage et tamisage. Durant cette étape essentielle l'établissement d'interactions entre les particules mène à l'agglomération de la semoule pour former des granules de couscous. Cette étape de formation de grumeaux est d'une grande importance car elle contrôle en partie l'étendue des mécanismes d'agglomération humide durant lesquels les nuclei s'associent pour former des agglomérats (Saad *et al.*, 2011).

Les conditions opératoires de l'étape (hydratation/malaxage) affectent considérablement le comportement technologique de la masse humide dans les étapes ultérieures du procédé et contribuent ainsi à la qualité finale du produit (Saad *et al.*, 2011). Dans le cas de la fabrication du couscous, les mécanismes d'agglomération observés pendant l'hydratation/malaxage sont complexes parce que : (i) Les caractéristiques des agglomérats humides obtenus (distribution de la taille, densité, forme, etc.) déterminent la qualité des grains de couscous final. (ii) L'agglomération affecte directement l'efficacité du rendement en couscous. En effet, cette étape peut générer de grandes quantités de recyclage, jusqu'à 2,5 fois le débit de la semoule initiale (Abecassis *et al.*, 2012). Le paramètre le plus influant sur le rendement de l'opération

de roulage est le taux d'hydratation des semoules (Aluka *et al.*, 1985; Guezlane, 1993; Debbouz *et al.*, 1994; Dahoun-Lefkir, 2005).

Les caractéristiques des couscous à l'état sec et la qualité culinaire sont influencées par le taux d'hydratation. En effet, avec l'accroissement du taux d'hydratation, la granulométrie augmente (Saad *et al.*, 2011; Barkouti *et al.*, 2012; Rondet *et al.*, 2016) et l'indice de gonflement du couscous augmente (Aluka *et al.*, 1985; Guezlane, 1993). Tandis que, la délitescence diminue avec l'accroissement du taux d'hydratation (Aluka *et al.*, 1985). Toutefois, l'augmentation du taux d'hydratation n'est pas sans incidences sur les caractéristiques des produits finis. Selon Guezlane (1993), l'augmentation du taux d'hydratation a tendance à augmenter le collant des produits finis et à favoriser les réactions d'oxydation enzymatique impliquant la destruction des pigments caroténoïdes.

L'influence des conditions d'hydratation sur la qualité du couscous reste encore très mal connue.

La relation entre les protéines et la qualité du couscous est très peu étudiée malgré le rôle primordial que jouent ces dernières dans la qualité culinaire et technologique des produits céréaliers. Des travaux récents ont montré l'effet des protéines dans le mécanisme d'agglomération des semoules de blé dur. La viscosité des particules de semoule humide est liée à la teneur en protéines, tandis que la formation des grumeaux est en partie ralentie par un pourcentage élevé en protéines polymériques insolubles (Joubert *et al.*, 2018). Par ailleurs, Bellocq *et al.* (2018) ont observé que l'impact de la teneur en protéines sur l'agglomération est plus faible que celui de la granulométrie. Toutefois, selon les mêmes auteurs une teneur en protéines élevée renforce la structure en favorisant le collage entre les particules de semoule.

L'objectif de ce travail est d'approfondir les modifications physico-chimiques complexes subies par les constituants des semoules, lors de l'hydratation, notamment les protéines et leurs interactions moléculaires. De suivre l'évolution de la qualité technologique du couscous au cours de l'agglomération du couscous.

La démarche adoptée est la suivante :

- Etude de l'influence des conditions d'hydratation (taux et température de l'eau) des semoules de blé dur sur la qualité technologique du couscous. Etude et l'optimisation des conditions d'hydratation des semoules de blé sur la qualité du couscous.

- Etude des modifications biochimiques des protéines en fonction des conditions d'hydratation des semoules au cours de la fabrication du couscous.

1- Couscous

1-1 Définition du couscous

Le couscous est un produit composé de semoule de blé dur à laquelle est ajoutée pour l'agglomérer, de l'eau potable et soumise à des traitements physiques (malaxage et roulage) et à des traitements thermiques (précuisson et séchage). Aucun autre ingrédient n'est ajouté sauf le sel, éventuellement présent dans l'eau d'hydratation utilisée pour l'agglomération de la semoule (AFNOR, NF V50-001 1992).

1-2 Procédé de fabrication du couscous

Le principe général de fabrication du couscous est le même que ce soit dans le procédé industriel ou dans le procédé artisanal. Il est basé sur l'agglomération des particules de semoule avec de l'eau. Le processus de fabrication du couscous artisanal diffère d'une région à une autre, d'un foyer à un autre, voire même d'une personne à une autre. Le procédé industriel apparaît comme une mécanisation de toutes les opérations manuelles par lesquelles se prépare traditionnellement le couscous.

Le procédé de fabrication du couscous se compose de trois principales étapes :

- **Hydratation et roulage** : c'est la première étape dans le processus de fabrication du couscous. Elle correspond à la formation de grains de couscous humides par le processus d'agglomération humide suite aux opérations de mouillage, malaxage, roulage et tamisage. L'hydratation des semoules est une étape essentielle dans le processus de fabrication du couscous. Durant cette étape, la formation d'interaction entre les particules de semoule conduit à leur agglomération sous forme de granules de couscous (figure 1). La connaissance et le contrôle des interactions entre l'eau et les constituants de la semoule de blé dur peuvent être considérés comme le facteur principal dans le procédé global de fabrication du couscous (Hébrard *et al.*, 2003). C'est donc, une opération délicate où les caractéristiques physiques du produit finis y sont pratiquement établies.

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 Ménard, 1992) ou aussi par l'apparition d'un brunissement ayant pour origine la polyphénol-oxydase (Feillet, 2000).

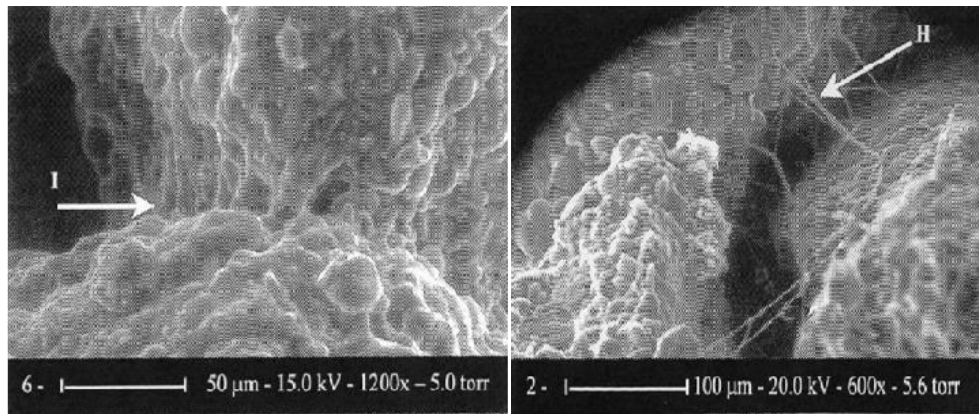


Figure 1 : Microstructure d'agglomérat humide après le roulage (Hebrard, 2002).

- **Précuisson** : c'est la deuxième étape dans le processus de fabrication du couscous. Elle correspond au traitement hydrothermique des grains de couscous humides. Selon Guezlane (1993), les traitements hydrothermiques, appliqués pendant la précuisson à la vapeur du couscous, provoquent des modifications considérables des caractéristiques des produits finis. Les granules de couscous deviennent plus hydrophiles et leur tendance à s'agglomérer diminue. Sur le plan physico-chimique, ces traitements entraînent des bouleversements des constituants de la semoule : dénaturation des protéines et gélatinisation de l'amidon. Les travaux de Bekraddouma (1992) et Guezlane (1993) montrent que le traitement hydrothermique améliore nettement la couleur jaune du produit fini par l'inhibition des lipoxygénases responsables de la destruction des pigments caroténoïdes.

La capacité de fixation d'eau dépend de la durée et des conditions d'application du traitement hydrothermique. Ainsi, l'effet conjoint de la chaleur et de l'humidité sur les grains d'amidon provoque leur désintégration et expose leurs fonctions hydroxyles au milieu extérieur favorisant le phénomène de gélatinisation avec une perte substantielle de l'amylose à la surface des produits (Adrian et Frangne, 1987). Sur le plan physico-chimique et dès les premières minutes du traitement hydrothermique, l'amylose va être complexée par les acides gras et les monoglycérides de la semoule, et entraîner une diminution du collant entre les particules du couscous (Guezlane, 1993).

Au cours de la précuisson du couscous, les deux phénomènes (gélatinisation de l'amidon et dénaturation des protéines) sont concomitants. Les caractéristiques des produits finis vont dépendre de la résultante de ces effets (Guezlane, 1993).

- **Séchage** : c'est la troisième étape dans le procédé de fabrication du couscous. Elle consiste à stabiliser les grains de couscous cuits par un séchage assurant une durée de stockage prolongée des grains de couscous secs.

Au cours du processus de fabrication du couscous, le changement dans le contenu en eau et de température induit des modifications microscopiques et moléculaires au niveau de la semoule. Très peu d'études ont décrit la fabrication du couscous et les modifications qui se produisent. Cuq et Abecassis (2006), font partie des scientifiques qui se sont intéressés à cet aspect.

Ces auteurs ont montré des microphotographies des particules de semoule sèche, après hydratation et les granules de couscous finaux (figure 2). 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).

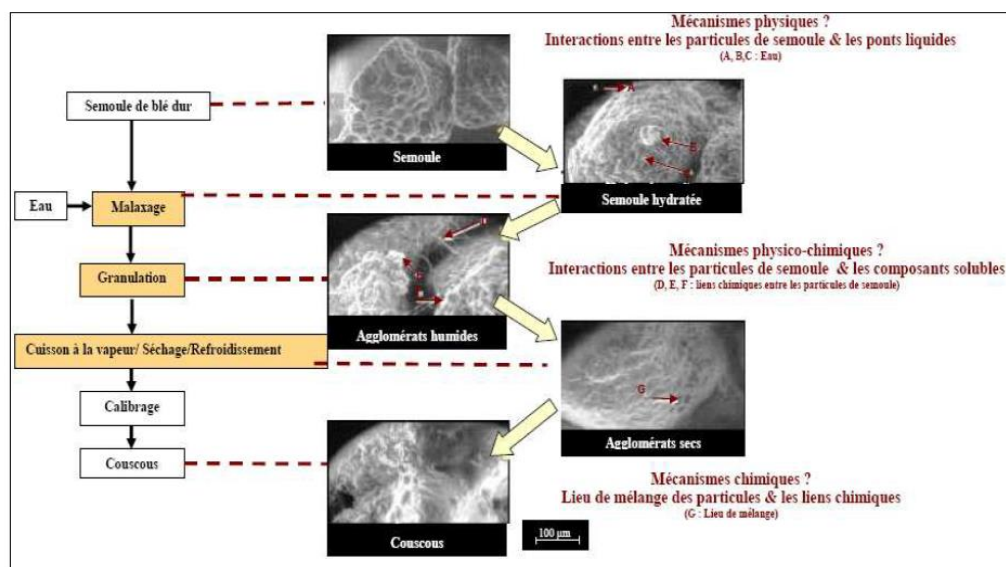


Figure 2 : Microphotographies de grains secs et hydratés de semoule, d'agglomérats secs et humides, et grains de couscous et hypothèses du mécanisme de formation des grains de couscous (Cuq et Abecassis, 2006).

À 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-teneur en eau" qui indique les principaux changements chimiques suivants (figure 3):

- La transition vitreuse des protéines;
- La réticulation des protéines;
- La gélatinisation de l'amidon (Cuq et 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 3).

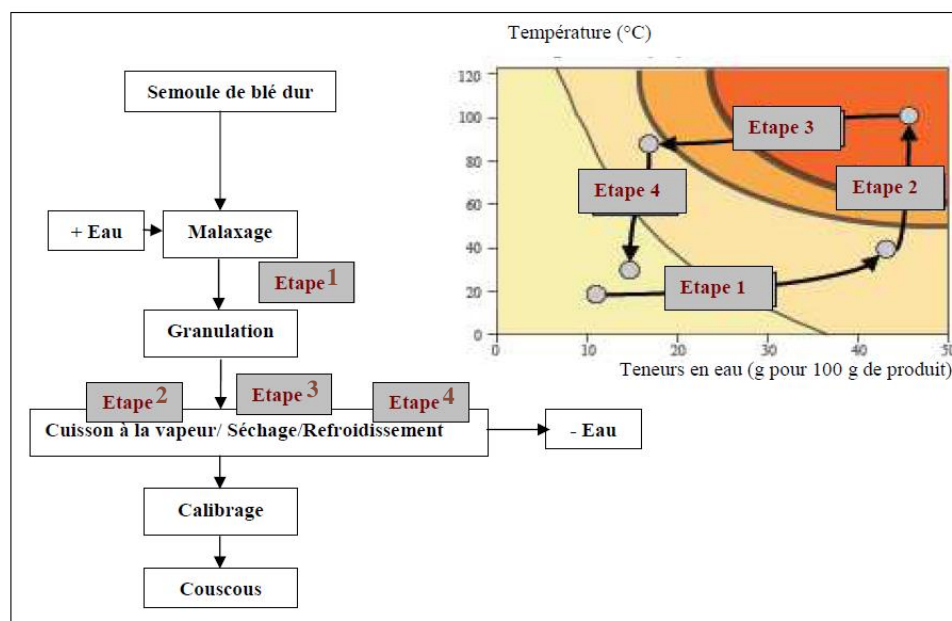


Figure 3 : Superposition des étapes de fabrication du couscous sur le diagramme d'état des composants de blé dur (amidon & protéines) (Cuq et Abecassis, 2006).

1-3 Mécanisme d'agglomération de la semoule au cours du roulage

La première étape de fabrication du couscous est le mouillage/malaxage qui contribue significativement à la qualité finale des grains de couscous (taille et texture). Très peu d'étude ont été réalisées sur l'agglomération de la semoule de blé dur à cause de la réactivité de la surface (gonflement, solubilisation des composants et formation d'un réseau macromoléculaire grâce aux interactions protéiques) (Saad *et al.*, 2010).

Le procédé d'agglomération par voie humide est basé sur le couplage des trois opérations unitaires. L'addition du liquide qui provoque d'abord des forces d'adhésion entre les particules. Le mélange de la masse de poudre qui disperse le liquide sur les particules et

favorise la croissance des agglomérats. Une opération finale de séchage qui est nécessaire pour stabiliser les agglomérats (Hafsa *et al.*, 2015).

L'agglomération de poudres alimentaires implique des changements irréversibles aux particules, et la contribution des forces visqueuses pour stabiliser les agglomérats. Les poudres alimentaires réagissent lorsqu'ils sont soumis à une augmentation de la teneur en eau et l'activité de l'eau, et/ou à des températures croissantes, alors que leurs molécules subissent des transformations physico-chimiques irréversibles (Cuq *et al.*, 2013).

Au cours de l'agglomération, les particules de la semoule natives sont rassemblées pour former de plus grands ensembles, appelés agglomérats. La connaissance de l'agglomération de la semoule de blé dur reste encore partielle, bien que des travaux scientifiques importants ont été réalisés au cours de ces dernières années (Saad *et al.*, 2010; Saad *et al.*, 2011; Barkouti, 2012; Cuq *et al.*, 2013; Hafsa *et al.*, 2015; Rondet *et al.*, 2016) et des modèles ont été proposés pour décrire les mécanismes d'agglomération.

Selon Saad *et al.* (2011), lorsque la semoule de blé dur est mélangée à une quantité suffisante d'eau, des changements significatifs dans la distribution granulométrique et dans les caractéristiques du grain se sont produites. Saad *et al.* (2010) ont suggéré un mécanisme pour décrire le phénomène d'agglomération du couscous induit par les étapes de mouillage/mélange pour la semoule de blé dur (figure 4). La description proposée du mécanisme d'agglomération repose sur les phases suivantes : le mouillage, la nucléation, la croissance (particules de semoule native, nucléi et agglomérats de couscous).

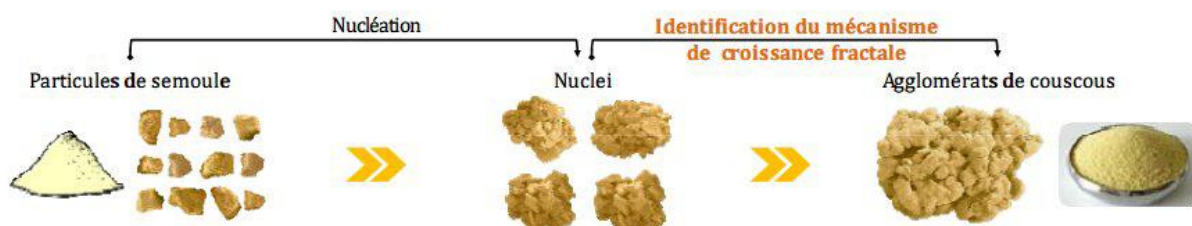


Figure 4 : Mécanisme d'agglomération de la semoule de blé dur (Saad *et al.*, 2010).

Hafsa *et al.* (2015) ont proposé un modèle fonctionnel capable de décrire l'impact des paramètres du procédé sur les mécanismes physico-chimiques impliqués pendant l'agglomération (figure 5). A partir de la poudre native, le mélange des particules et l'addition d'eau initient les mécanismes de nucléation et de croissance qui conduisent à la formation des agglomérats humides. Le traitement à la vapeur induit de grands changements physico-

chimiques qui contribuent à renforcer les agglomérats et à contrôler leurs propriétés finales. La diminution rapide de la teneur en eau pendant l'étape de séchage ne permet pas les mécanismes physico-chimiques de se produire de façon significative.

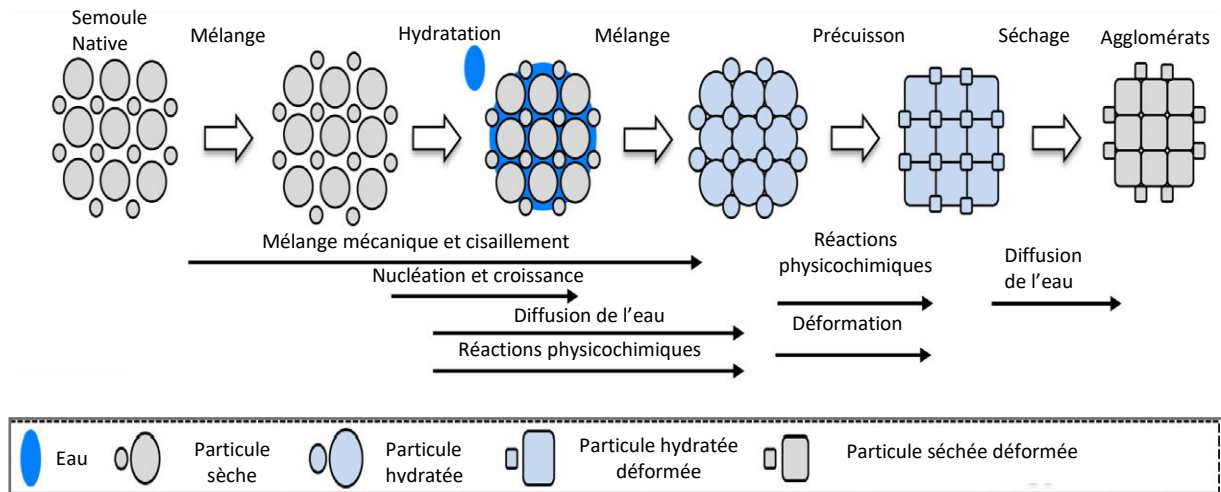


Figure 5: Modèle mécaniste qui décrit les mécanismes physiques et physico-chimiques impliqués dans l'agglomération des poudres de blé (Hafsa *et al.*, 2015)

Pour agglomérer les particules initiales de semoule de blé dur, des quantités spécifiques d'eau et d'énergie mécanique sont nécessaires pour former des agglomérats de la bonne taille, avec suffisamment d'interaction entre les particules de la semoule pour obtenir des structures stables (Saad *et al.*, 2011). Ces auteurs ont observé la microstructure des particules formées aux différents stades d'agglomération de la semoule de blé dur au cours de la mise en forme du couscous. Ils ont identifié 4 types de grains qui ont été générés dans des conditions spécifiques de niveaux d'eau (figure 6).

- Des particules de petite taille (figure 6 (A)) ont été principalement observées à des niveaux d'hydratation faible (0,15 - 0,25 g d'eau/g de matière sèche). Ces petites particules sont des particules de semoule de blé dur natives qui ne sont pas encore en contact avec l'eau pendant l'étape de l'hydratation/mélange.
- Certains grains aux diamètres près de 0,6-1mm (figure 6 (B)) ont été observées au niveau d'hydratation compris entre 0,25 et 0,40 (g d'eau/g de matière sèche). Ces grains semblent résulter de l'association des particules natives de semoule de blé dur. Ces gros grains peuvent être considérés comme les nucléi, qui pourraient tout simplement être générés par l'association de plusieurs particules de semoule natives avec des gouttelettes d'eau pendant l'étape de l'hydratation. Il est encore possible d'observer la forme native des particules de semoule à la surface du nucléi (figure 6

(B)). Sur la figure 6 (C), qui est un zoom de la figure 6 (B), on peut observer que les structures du nucléi sont formées à partir de l'adhésion des particules de la semoule native. La stabilité des structures du nucléi peut être expliquée par des ponts capillaires qui génèrent des forces de frottement entre les particules de la semoule native.

- Certains gros grains irréguliers avec diamètre apparent près de 1-3mm ont été observés à des niveaux d'hydratation compris entre 0,40 et 0,55 (g d'eau/g de matière sèche). Ces gros grains irréguliers, appelés agglomérats, semblent être formés par l'association de plusieurs nucléi selon le mécanisme de coalescence (figure 6 (D) et (E)). Ce mécanisme de cohésion est accompagné par un changement dans la microstructure des particules de la semoule dû au comportement réactif de ces particules. La stabilité des agglomérats est assurée par les ponts capillaires comme c'est le cas du nucléi et par les interactions biochimiques dues au large changement dans la microstructure des particules de la semoule.
- De très gros grains ayant un diamètre apparent supérieur à celui 4-6mm ont été observés à un taux d'hydratation supérieure à 0,55 (g d'eau/g de matière sèche) (figure 6 (F)). Ces très gros grains sont appelés pièces de pâte. La structure interne des pièces de pâte semble être formée d'une structure continue de pâte dont il est impossible d'identifier les particules natives de la semoule (figure 6 (G)). Ceci peut être dû aux interactions biochimiques prolongées entre les composants de blé qui contribuent à la génération de la structure interne continue des pièces de pâte qui représentent la structure transitoire entre l'agglomérat et la pâte continue.

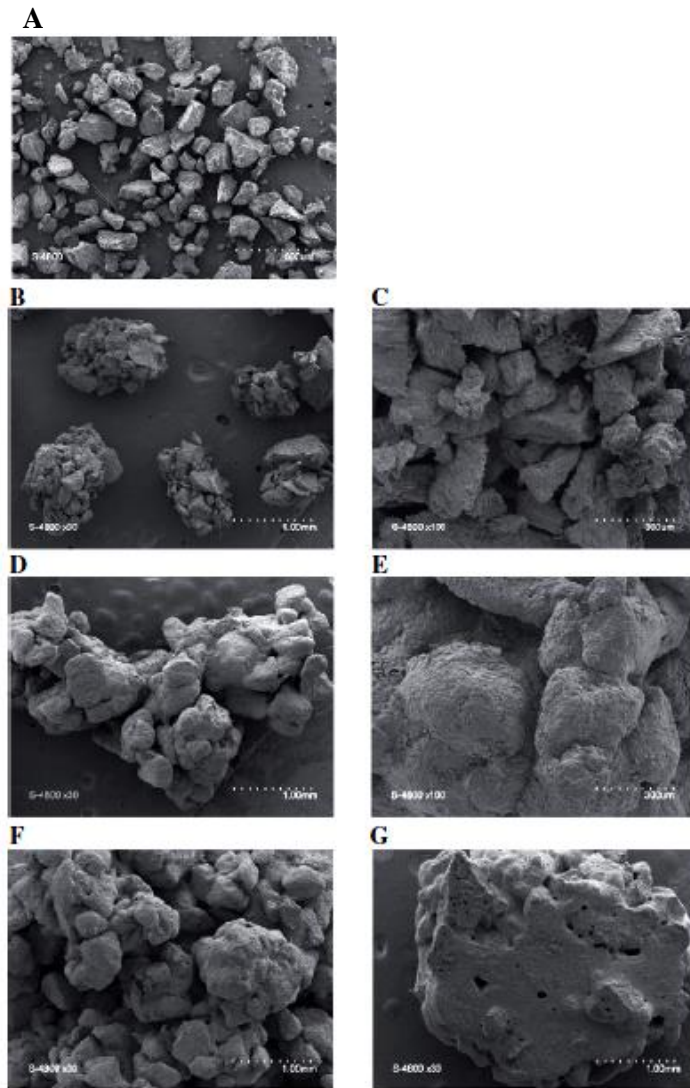


Figure 6 : SEM microstructure des particules de la semoule de blé dur (A) des grains formés après hydratation et malaxage: nucléi (B,C), des agglomérats (D,E) et des pièces de pâte (F,G) (Saad *et al.*, 2011)

1-4 Qualité du couscous

Pour les pâtes alimentaires, en général, la qualité culinaire ne peut être expliquée que par l'interaction entre les macromolécules. Il faut souligner que les principaux constituants (amidon, protéines, lipides) de la semoule et de ses dérivés (pâtes alimentaires, couscous, etc.) ne peuvent être considérés séparément (Feillet, 1986). Les complexes formés par ces macromolécules sont sous la dépendance des étapes et des conditions de fabrication (Yousfi, 2002). Donc, la qualité du couscous dépend, d'une part de la matière première dont il est issu

qui elle même, est liée à ses caractéristiques physiques (granulométrie) et à sa composition biochimique. Et d'autre part, aux conditions de fabrication du couscous.

Les critères retenus pour l'évaluation de la qualité sont : la granulométrie du couscous, sa couleur, sa texture, son gonflement, et sa prise en masse après réhydratation (Trentesaux, 1995). Ces critères sont aussi repris en tout ou en partie par Guezlane et Abecassis (1991) et par la norme française AFNOR (NF V 50-001 1992).

La qualité organoleptique du couscous regroupe la qualité commerciale qui concerne l'aspect du couscous à l'état sec (couleur, granulométrie, forme des particules, etc.) et la qualité culinaire qui représente le comportement des grains du couscous au cours de la cuisson (gonflement, prise en masse, délitescence, fermeté, etc.) (Guezlane, 1993).

Un couscous de qualité est défini par la majorité des consommateurs comme étant un produit fin, de granulométrie régulière et homogène et de couleur jaune clair (Guezlane, 1993; Yousfi, 2002; Derouiche, 2003). Le *codex alimentarius* (CODEX STAN 202-1995) indique que la granulométrie de couscous doit être comprise entre 630 et 2000 μm .

La qualité culinaire d'un produit alimentaire correspond au comportement de l'aliment pendant et après sa cuisson (Yettou, 1998). Boudreau et Ménard (1992) ont souligné que la qualité culinaire du couscous est appréciée par sa tenue à la cuisson telle que reflétée par l'état de surface qui doit être non collant et par la délitescence qui traduit la désintégration des particules de couscous. Par ailleurs, Guezlane (1993) a indiqué que le couscous de bonne qualité culinaire doit présenter un bon gonflement, une consistance qui n'est pas trop ferme, un aspect moelleux et une facilité à la mastication. Selon Debbouz et Donnelly (1996), la capacité de couscous d'absorber rapidement la sauce et de maintenir sa fermeté est considérée comme indicateur de couscous de bonne qualité.

2- Influence des conditions de l'hydratation sur la qualité du couscous

2-1-Influence du taux d'hydratation

L'augmentation du taux d'hydratation n'est pas sans incidences sur les caractéristiques des produits finis. Les travaux ont montré que le taux d'hydratation influence la qualité des couscous à l'état sec ainsi que la qualité culinaire. Selon Aluka *et al.* (1985) et Guezlane (1993) un taux d'hydratation suffisamment élevé et un malaxage de longue durée sont recommandés.

A l'échelle industrielle, la conduite de l'étape d'agglomération est stratégique car elle contrôle directement les performances des lignes de production. Cette étape peut en effet générer des quantités importantes de produits à recycler (trop gros ou trop petits) qui représentent des flux jusqu'à 2,5 fois supérieurs aux flux de la semoule native (Abecassis *et al.*, 2012).

Le paramètre le plus influent sur le rendement de l'opération de roulage est le taux d'hydratation des semoules (Aluka *et al.*, 1985; Guezlane, 1993; Debbouz *et al.*, 1994; Dahoun-Lefkir, 2005). En effet, une hydratation insuffisante a pour effet de diminuer de manière très importante le taux de roulage au profit des fractions fines. Par contre, l'accroissement du taux d'hydratation des semoules engendre sans doute une augmentation sensiblement égale des fractions moyennes et grosses (Guezlane, 1993). De même Saad *et al.* (2011) et Barkouti *et al.* (2012) ont notés que l'augmentation du taux d'hydratation induit une croissance significative des plus grosses particules.

La granulométrie médiane du couscous (D50) est proportionnelle au taux d'hydratation (Guezlane, 1993). De même Saad *et al.* (2011), Barkouti *et al.* (2012) et Rondet *et al.* (2016) ont constatés une évolution du diamètre médian avec l'augmentation de la teneur en eau.

La dispersion géométrique du couscous (Sg) est inversement proportionnelle au taux d'hydratation (Rondet *et al.*, 2016). En revanche, Guezlane (1993) note que l'accroissement du taux d'hydratation et la durée de malaxage augmentent la dispersion granulométrique (Sg).

Selon Bar (2001), la couleur d'une pâte résulte essentiellement de deux caractéristiques du blé dur mis en œuvre : son potentiel en pigments caroténoïdes et son activité enzymatique, qui peut provoquer au cours, de la pastification, une altération de l'indice de jaune et une augmentation de l'indice de brun. Le taux d'hydratation élevé a un effet nuisible sur la couleur des couscous. En effet, l'indice de brun augmente avec l'augmentation du taux d'hydratation alors que l'indice de jaune diminue (Guezlane, 1993; Rondet *et al.*, 2016). L'augmentation du taux d'hydratation favorise les réactions d'oxydation enzymatique impliquant les peroxydases et des polyphénols-oxydases de la semoule (Guezlane, 1993).

Concernant la qualité culinaire, plusieurs auteurs ont noté que l'indice de gonflement du couscous augmente nettement avec l'augmentation du taux d'hydratation des semoules (Aluka *et al.*, 1985; Guezlane, 1993). Aluka *et al.* (1985) ont constaté que la délitescence diminue avec l'accroissement du taux d'hydratation. Selon Guezlane (1993), l'augmentation

du taux d'hydratation a tendance à augmenter le collant des produits finis. D'après Hafsa *et al.* (2015), les indices de solubilité dans l'eau des produits obtenus après le procédé d'agglomération sont plus élevés que ceux de la semoule native.

2-2-Influence de la température

Il est connu chez les ménagères que le roulage du couscous avec de l'eau froide permet de faciliter le roulage et d'augmenter le rendement. Or, dans la pratique l'eau utilisée dans la fabrication du couscous est à la température ambiante. Tandis que, pour la fabrication des pâtes alimentaires on utilise l'eau à 40°C. L'influence de la température de l'eau d'hydratation sur la qualité du couscous est très mal connue. Les seuls travaux qui existent sur cet aspect sont ceux de Dahoun-Lefkir (2005). Selon cet auteur, la diminution de la température de l'eau d'hydratation a eu un effet bénéfique sur les rendements en couscous car elle favorise la formation des grains de couscous est facilite le roulage. L'eau à basse température engendre des couscous de granulométrie élevée et homogène. Par contre, la coloration des couscous est améliorée par l'utilisation pour le roulage de l'eau à 40°C.

Les produits roulés avec de l'eau froide présentent une meilleure qualité culinaire. En effet, lorsque la température de l'eau d'hydratation diminue le gonflement des couscous augmente et le collant et les indices de solubilité diminuent Dahoun-Lefkir (2005).

3- Modifications biochimiques des protéines

3-1- Les protéines

Les protéines, second constituant du blé après l'amidon, forment de 8 à 18% de la matière sèche du blé selon l'espèce et le degré de maturité du grain (Feillet, 2000). Elles sont très diversifiées en taille et en propriétés fonctionnelles et restent malheureusement très mal caractérisées car il est difficile de les solubiliser sans endommager leur structure. Elles sont classiquement séparées en quatre groupes en fonction de leur solubilité dans différents solvants (Osborne, 1907).

- les albumines, solubles dans l'eau;
- les globulines, solubles dans les solutions salines diluées;
- les gliadines, solubles dans les alcools dilués de type éthanol 70%;
- les gluténines insolubles dans les solvants précédents et partiellement solubles dans les solutions acides et basiques diluées.

Il existe d'autres classifications basées sur la solubilité davantage des gluténines dans d'autres solvants. Pour cela, on peut citer l'urée (Pomeranz, 1965) ou le dodécyl sulfate de sodium (SDS) (Graveland *et al.*, 1979). Toutefois une partie des gluténines, appelée "résidu de gluténine" par Bushuk et Wrigley (1974) ou "Glutenin Macro Polymer" (GMP) par Graveland *et al.* (1979), reste toujours insoluble dans les différents solvants utilisés. Shewry *et al.* (1986) ont proposé une classification qui ne recouvre que partiellement celle d'Osborne. Cette classification est basée sur le degré de polymérisation et la teneur en acides aminés soufrés des protéines insolubles. Dans cette classification, les gliadines forment la famille des prolamines monomériques et les gluténines sont regroupées dans la famille des prolamines polymériques constituées de sous-unités de faible et de haut poids moléculaire. La figure 7 résume ces deux classifications.

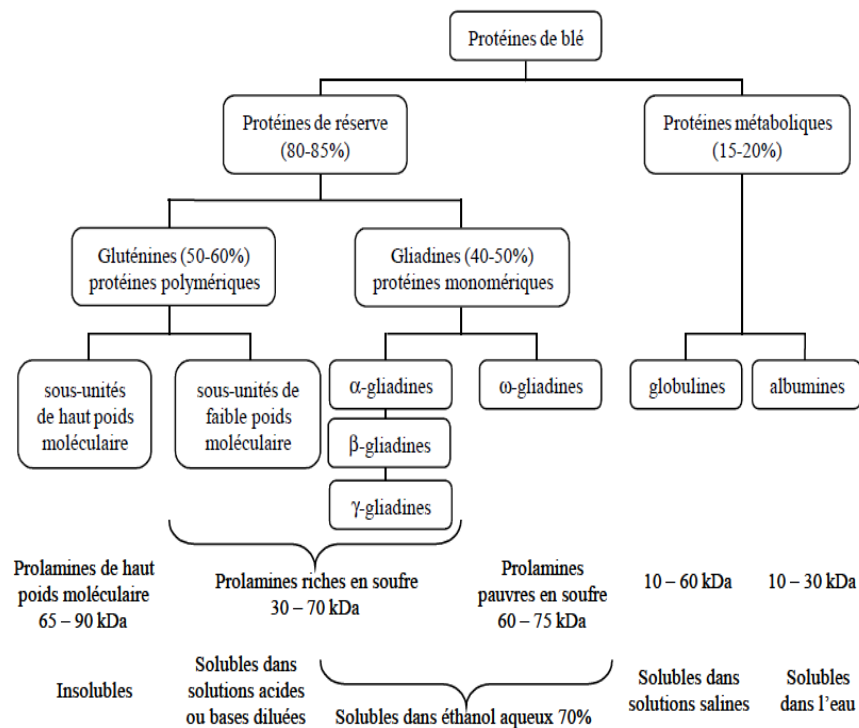


Figure 7 : Classification des protéines selon Osborne (1907) et Shewry *et al.* (1986).

Les albumines et globulines, minoritaires dans la farine (15-20% des protéines) (Wrigley et Bietz, 1988), constituent les protéines métaboliques du grain de blé et sont regroupées sous le terme de protéines solubles. Les poids moléculaires des albumines et globulines sont compris entre 5000 et 60000 (Dacosta, 1986; Melas *et al.*, 1993; Gianibelli *et al.*, 2001). Selon Gianibelli *et al.* (2001), la majorité de ces protéines sont des enzymes et des inhibiteurs d'enzymes.

Les gliadines et gluténines, majoritaires dans la farine (80-85% des protéines) (Wrigley et Bietz, 1988), constituent les protéines de réserve du grain de blé. Ce sont les protéines les plus importantes de la farine d'un point de vue technologique car elles sont constitutives du gluten (Pomeranz, 1988).

Les gliadines sont des chaînes de polypeptides monomériques associées par des ponts hydrogène et hydrophobe alors que les gluténines sont constituées de multiples chaînes liées entre elles par des ponts disulfures (MacRitchie, 1992).

Les gliadines confèrent au gluten son extensibilité et les gluténines contribuent à sa ténacité et à son élasticité (Schofield et Booth, 1983).

Les gliadines sont définies comme étant la fraction protéique soluble dans l'éthanol aqueux à 70% à température ambiante (Payne *et al.*, 1984), ce sont des protéines monomériques qui représentent 30 à 40% des protéines totales de la farine (Daniel et Triboui, 2000). Elles ont un poids moléculaire de 25000 à 75000 (Melas *et al.*, 1993).

Elles se caractérisent par leur richesse en glutamine, en proline et par leur pauvreté en acides aminés basiques. Elles sont également pauvres en acides aminés soufrés, et dépourvues de ponts disulfures ou qui ont uniquement des ponts disulfures intra-chaînes (Gianibelli *et al.*, 2001).

Les gluténines représentent 40 à 50% des protéines totales, elles sont légèrement plus riches en acides aminés basiques que les gliadines et se caractérisent comme celles-ci par leur richesse en proline et en acide glutamique (Feillet, 2000).

La fraction gluténine est constituée d'agrégats de protéines liées par des ponts disulfures, leurs poids moléculaires varient de 500000 à plus de 10 millions (Wieser *et al.*, 2006).

Après l'action d'agents réducteurs de ponts disulfures, on distingue deux grands groupes de sous-unités qui peuvent alors être définis sur la base de leur mobilité électrophorétique (Graveland *et al.*, 1985; Lindsay et Skerritt, 1999):

- les sous-unités gluténines de faible poids moléculaire SG-FPM
- les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire SG-HPM

Les sous-unités de gluténines à FPM constituent 60 à 80% des gluténines (soit 20 à 30% des protéines totales) (Melas *et al.*, 1993). Ainsi, les sous unités de gluténines à HPM représenteraient 20 à 40% des gluténines.

Ces deux types de sous-unités gluténine sont riches en acide glutamique et en proline et contiennent entre une et plus de sept cystéines selon les sous-unités (Payne *et al.*, 1981; Keck-Gassenmeier et Wieser, 1996; Shewry et Tatham, 1997; Masci *et al.*, 1999). Ces sous unités seraient liées entre elles par des liaisons disulfures intermoléculaires (Kasarda, 1989; Köhler *et al.*, 1993), comme l'atteste l'action d'agents réducteurs. C'est d'ailleurs l'aptitude des sous-unités gluténines à s'associer par des liaisons disulfures intermoléculaires qui serait à la base des propriétés visco-élastiques de la pâte et du gluten (Ewart, 1968, 1990). Des liaisons intramoléculaires sont également possibles au sein des sous-unités gluténines.

Les sous unités de gluténines à haut poids moléculaire sont codées par deux gènes étroitement liées l'un de type x qui code pour les sous unités les moins mobiles et l'autre de type y qui code pour les sous unités les plus mobiles (Payne *et al.*, 1981) avec un poids moléculaire de 83000 à 88000 et 67000 à 74000 respectivement (Foti *et al.*, 2000).

3-2-Influence de l'hydratation et du mélange sur les modifications des protéines

Dans toutes les industries céréalières, les opérations de mélange de farine et d'eau constituent généralement la première étape du procédé et leur bonne conduite conditionne en partie la qualité des produits finis. La quantité d'eau ajoutée ainsi que l'action et la quantité d'énergie mécanique fournie lors de cette opération sont autant d'éléments critiques pour la structure du mélange et le développement du réseau de gluten (Auger, 2008). Le malaxage, terme utilisé dans les industries pastières, permet d'obtenir une pâte granuleuse constituée d'agglomérats hydratés de particules de farine. Cela est possible par un mélange peu énergétique de la farine de blé en présence de faibles quantités d'eau (30-35% de la masse de farine). Ce procédé ne permet généralement pas le développement du réseau de gluten (Matsuo *et al.*, 1978; Dexter et Matsuo, 1979). De même, au cours du processus de fabrication du couscous, le changement dans la quantité d'eau et de la température induisent des modifications significatives dans la réactivité des composantes 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 et Abecassis, 2006).

Le gluten est un système de réseau de polymère qui est stabilisé par diverses interactions, telles que des liaisons covalentes, des interactions non covalentes (liaisons hydrogène, interactions hydrophobes) et des enchevêtrements (pour les répertories) (Domenek *et al.*, 2004). Dans son modèle nommé “loop-and-train”, Belton (1999) propose que de très nombreuses liaisons hydrogène permettraient de lier deux chaînes de gluténine (figure 8). Cette densité de liaisons hydrogène serait à l’origine du caractère élastique du gluten. En l’absence d’eau, les chaînes de gluténine auraient tendance à se lier les unes aux autres en une masse dense, les protéines étant peu structurées (figure 8). Lors de l’hydratation, les interactions protéines-protéines (trains) deviennent peu à peu remplacées par des interactions protéines-eau. Cependant, les liaisons hydrogène interprotéiques seraient si nombreuses qu’il serait improbable qu’elles soient toutes rompues simultanément par l’action de l’eau. Des zones d’interaction entre les protéines demeureraient donc, définissant des chaînes liées (“trains”), tandis que les parties protéiques hydratées donneraient naissance à des boucles lâches (“loops”) dont le nombre augmenterait avec l’hydratation (figure 8). Des liaisons disulfures permettraient, quant à elles, de lier successivement les chaînes de gluténines au niveau de leur extrémité terminale (Belton, 1999).

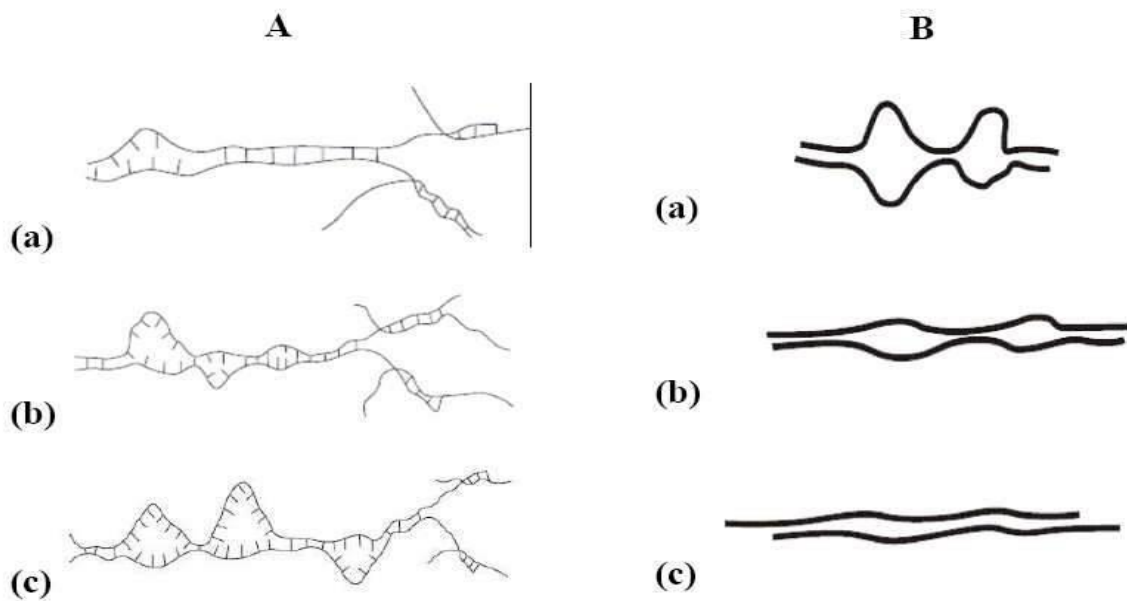


Figure 8: Modèle “loop-and-train” proposé par Belton (1999) pour décrire la structure du gluten. **(A)** Effet schématique de l’hydratation des boucles et des chaînes et **(B)** Effet schématique de la déformation des boucles et des chaînes. **A:** (a) faible hydratation: liaisons hydrogène principalement interchaînes, (b) hydratation intermédiaire: formation des boucles, (c) forte hydratation: équilibre entre boucles et chaînes. **B:** (a) pas de déformation: conformation à l’équilibre, (b) faible déformation: déformation des boucles, (c) forte déformation: allongement des boucles et glissement des chaînes de gluténine les unes sur les autres par rupture des liaisons hydrogène.

Deux types de réaction sont essentiels dans la formation du réseau, bien que d'autres types de réaction soient également présents. L'une est l'oxydation, dans laquelle les groupes sulfhydryl (SH) libres sont oxydés dans des liaisons disulfures (SS), ce qui conduit à la formation d'agrégats de grandes protéines (Bruneel *et al.*, 2011). L'autre est l'échange de sulfhydryl-disulfure (SH-SS), dans lequel la gliadine se lie à la gluténine, qui implique le clivage ou la réformation des liaisons SS. Cela conduit à la dépolymérisation et au réarrangement des polymères de gluténines (Lagrain *et al.*, 2008).

La modification de la solubilité des protéines peut provenir des modifications du degré d'association entre les chaînes polypeptidiques. Des liaisons hydrogène, des interactions hydrophobes, des liaisons ioniques ou des liaisons covalentes disulfures sont couramment impliquées dans ces phénomènes (Feillet *et al.*, 1977).

L'eau dans les pâtes est un élément fondamental et c'est un facteur d'organisation. Il peut intervenir :

- D'une part, en provoquant des phénomènes de mise en solution, de gonflement et de dispersion par suite de l'affaiblissement et de la rupture des liaisons intermoléculaires ;
- D'autre part, dans l'organisation des structures, soit en facilitant le déplacement et l'orientation des molécules, soit plus directement en formant des ponts interchaînes ou soit encore en induisant des interactions hydrophobes (Potus *et al.*, 1992).

Potus *et al.* (1992) ont noté que la présence d'eau solvante dans la pâte a des conséquences sur la structure de celle-ci. D'une part, elle fragilise l'ensemble des liaisons, c'est un agent de rupture des liaisons covalentes ioniques et hydrogène. D'autre part, elle entraîne une redistribution des interactions hydrophobes. Et enfin, elle est aussi un agent liant parce qu'elle forme des ponts par liaisons hydrogène entre les constituants qu'elle a éloignés les uns des autres.

L'influence de l'étape de l'hydratation et du roulage sur les modifications des protéines de la semoule n'a jamais été étudiée. Les seuls travaux qui existent dans ce domaine sont ceux sur la pâte des pâtes alimentaires et la pâte à pain. Toutefois, l'étape de l'hydratation et du mélange de la pâte des pâtes alimentaires montre des similitudes avec celle du couscous, où une hydratation et une énergie appropriées sont essentielles pour obtenir des produits de

bonne qualité à structure granulaire mais sans développer la pâte (Debbouz et Donnelly, 1996).

Après l'hydratation, et avant le développement de la pâte, l'eau se diffuse lentement dans les particules de semoule et augmente la mobilité des protéines par un effet plastifiant (Hoseney *et al.*, 1986), permettant la formation d'un réseau de protéines avec une solubilité croissante dans l'acide dilué et la réduction de la teneur en groupe -SH, avec la formation de nouvelles liaisons S-S entre les protéines (Icard-Verniere et Feillet, 1999). Ces auteurs supposent qu'une quantité suffisante d'eau est présente pendant cette étape pour assurer une bonne mobilité des protéines, ce qui permet une transition vitreuse.

De très nombreux travaux se sont intéressés aux modifications biochimiques se produisant au cours du mélange de la pâte. La modification de la distribution en taille des polymères de gluténines est parmi l'une des plus remarquables. Dans la littérature, la fraction de polymères de gluténines insolubles dans le SDS (gluténine insoluble) est nommée UPP (Unextractable Polymeric Protein) ou GMP (Glutenin Macro Polymer) pour traduire un degré de polymérisation élevé (Graveland *et al.*, 1982; Skerritt *et al.*, 1999a).

Les étapes de traitement des pâtes influent sur la solubilité du polymère de la gluténine dans le SDS. Le mélange de la semoule et de l'eau pendant la fabrication de la pâte des pâtes alimentaires entraîne une diminution des gluténines insolubles. Ce changement, associé à une augmentation de la protéine soluble dans le SDS, a été attribué à la dissociation et à la dépolymérisation des plus grands polymères de gluténines (les insolubles dans le SDS). Le mélange de la semoule sèche dans les agglomérats humides entraîne une augmentation de la teneur en protéines solubles en SDS extractibles, en particulier au profit des polymères de gluténines (F1 + F2) (Icard-Verniere et Feillet, 1999; Kratzer, 2007; Bruneel *et al.*, 2016; Joubert *et al.*, 2018). Une augmentation similaire de l'extractibilité des protéines coïncidant avec la diminution des protéines insolubles dans le SDS, se produit également lors du mélange de la pâte à pain. Elle a été liée à la dissociation et à la dépolymérisation des plus grands polymères de gluténines (les insolubles dans le SDS) (Weegels *et al.*, 1997; Aussenac *et al.*, 2001; Don *et al.*, 2003; Don *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2016). Ces changements dans les propriétés protéiques du mélange surviennent après l'addition d'eau à la semoule et avant la formation de la pâte (t 0min) (Pritchard et Brock, 1994; Icard-Verniere et Feillet, 1999; Skerritt *et al.*, 1999a).

Plusieurs chercheurs ont constaté que la quantité de polymère de gluténines inextractibles diminue pendant le mélange de la pâte et augmente encore pendant le repos de la pâte, bien que la nature du polymère avant le mélange soit différente de celui d'après le mélange (Mecham *et al.*, 1962; Tsen, 1967; Tanaka et Bushuk, 1973; Weegels *et al.*, 1996b; Skerritt *et al.*, 1999a; Wang *et al.*, 2016; Joubert *et al.*, 2018). Différents mécanismes ont été proposés pour expliquer ces observations. Il a été suggéré que, lors du mélange, la taille des agrégats de protéines diminue par séparation physique des agrégats ou par la rupture de liaisons non covalentes (Tsen, 1967) ou covalentes (Tanaka et Bushuk, 1973; MacRitchie, 1975; Wang *et al.*, 2007). Weegels *et al.* (1997), quant à eux, parlent tout simplement d'une dépolymérisation des polymères de gluténines de haut poids moléculaire.

En revanche, d'autres auteurs ont rapporté une diminution de l'extractibilité de la gluténine dans le SDS pendant le repos et ils ont supposé que la repolymérisation du polymère de la gluténine a lieu (Hamer et Lichtendonk, 1987; Weegels *et al.*, 1996b).

Pendant le mélange de la pâte, les quantités, la distribution de la taille de la protéine et la composition en sous-unité de gluténine dans les polymères non extractibles dans le SDS ont changé (Aussenac *et al.*, 2001). Le malaxage de la pâte entraîne des changements significatifs dans les quantités de macropolymères des gluténines (GMP) et HMW/LMW-GS. HMW-GS, LMW-GS et les rapports HMW/LMW-GS influent fortement sur les propriétés d'agrégation et de polymérisation de GMP à tous les stades du mélange et du repos de la pâte. Les fractions GMP et le rapport HMW/LMW-GS ont un grand effet sur les propriétés de la pâte. Ceci indique que les variétés de blé ayant des qualités et des utilisations finales différentes ont des rapports HMW / LMW-GS qui varient considérablement (Wang *et al.*, 2007). Don *et al.* (2005) ont supposé que les GMP peuvent changer de forme en raison de facteurs de mélange, de sorte que la distribution des particules de gluténines joue un rôle important dans la rhéologie de la pâte. Par conséquent, HMW / LMW des particules GMP peuvent être similaires, mais le mélange change leur taille.

La surveillance des modifications de la composition en sous-unités de gluténine du macropolymère GMP obtenu à partir des pâtes à différents stades du mélange a révélé que les changements les plus prononcés étaient dans les proportions relatives de HMW-GS, qui ont diminué avec le mélange à mesure que la taille du polymère a diminué (Skerritt *et al.*, 1999a).

La sorption d'eau modifie la structure et la fonction des protéines ; c'est le cas pour les enzymes dont les caractéristiques cinétiques V_m et K_m varient avec l'activité de l'eau (Drapron, 1985). C'est aussi le cas pour les protéines de réserve dont la forte capacité d'absorption d'eau conduit à des modifications de structure par fragilisation des liaisons hydrogène intra et intermoléculaires. Cette absorption d'eau participe ainsi directement à la formation du gluten. Les liaisons hydrogène sont trop lâches au sein de la pâte et sont même rompus par l'eau, puisqu'une lixiviation suffit pour isoler l'amidon (Potus *et al.*, 1992).

L'eau gonfle la protéine (gluten) qui peut être considérée comme interpénétrée par les granules d'amidon, et celles-ci sont concentrées dans une deuxième phase liquide (Eliasson et Larsson, 1993). Cette organisation de la pâte suggère des conséquences pour le comportement rhéologique où la teneur en eau de la pâte déterminera le renfort des remplisseurs (amidon) sur la matrice (gluten) (Larsson et Eliasson, 1996).

Les structures initiales du gluten et de l'amidon de blé semblent être réorganisées pendant l'hydratation au détriment d'interaction avec les molécules d'eau (Roman-Gutierrez *et al.*, 2002). Le gluten mélangé avec de l'eau cause une désagrégation des plus grandes protéines, suivie de l'habillage d'une structure continue et complexe de polymère (la matrice de gluten) (Weegels *et al.*, 1996a). Pendant l'hydratation, les liens hydrogène de glutamine-glutamine sont cassés et des liens hydrogène de glutamine-eau sont formés (Grant *et al.*, 1999).

3-3-Influence du traitement thermique sur les modifications biochimiques des protéines

L'une des premières conséquences du traitement hydrothermique sur les protéines est la dénaturation de la structure native par modification des interactions faibles (hydrogène, hydrophobes et ioniques) et covalentes (Guezlane, 1993).

Les protéines, sont fortement affectées par les traitements hydrothermiques. Ces traitements ont pour effet de provoquer la formation d'agrégats protéiques par la formation, entre les chaînes polypeptidiques, d'interactions non covalentes hydrophobes (Kasarda *et al.*, 1976) et de liaisons covalentes (Jeanjean *et al.*, 1980).

Dexter et Matsuo (1979) ont signalé que la température a un effet sur la distribution des protéines de la pâte. Ces auteurs ont noté qu'à une température de 30°C les gliadines et les gluténines solubles sont légèrement plus élevées que les protéines insolubles. A l'inverse, ils

ont constaté à une température de 50°C, une diminution de la proportion des fractions gliadines et gluténines et une grande augmentation des protéines insolubles.

Les traitements à la vapeur induisent la réticulation du réseau protéique qui est accrue avec la température et la durée du traitement (Wagner, 2010). Selon Lagrain *et al.* (2005) le traitement thermique des protéines de gluten de blé a entraîné une réticulation disulfure à travers des réactions d'échange de SH-SS et l'oxydation de SH libre, conduisant à la formation de grands agrégats de protéines et à des changements rhéologiques et fonctionnels.

Plusieurs auteurs ont constaté une diminution de l'extracibilité des protéines de gluten après le traitement thermique Guezlane (1993) et Guezlane *et al.* (1998) sur le couscous ; Booth *et al.* (1980) et de Ait Mouh (1989) sur les pâtes alimentaires et Wang *et al.* (2016) sur le pain chinois cuit à la vapeur.

Le traitement hydrothermique provoque une forte diminution de la surface totale du chromatogramme et entraîne la quasi disparition des deux premières fractions F1 et F2 constituées des agrégats gluténines HMWG et LMWG, sous-unités les plus agrégatives. 1min de traitement hydrothermique, l'insolubilisation est déjà quasiment réalisée. L'insolubilisation ne paraît pas s'accroître au delà de 8 minutes puisque pour les traitements à 8 et 24min des résultats presque identiques sont obtenus (Guezlane *et al.*, 1998).

Wang *et al.* (2016) ont remarqué que lors de la cuisson à la vapeur du pain chinois pendant 10 minutes, la gliadine extractible a fortement diminué par rapport à celle cuit à la vapeur pendant 5 minutes, ce qui indique qu'une grande quantité de gliadine est incorporée dans la gluténine à travers le mécanisme d'échange SH-SS. La gluténine, avec plus de sensibilité au chauffage, a eu la priorité de se polymériser en oxydant le SH libre en SS, ce qui s'est produit parallèlement à l'incorporation fractionnée de la gliadine.

Guezlane *et al.* (1998) ont observé une stabilité thermique du groupe des ω -gliadines. Cette stabilité a été signalée précédemment par plusieurs auteurs (Autran et Berrier, 1984; Kobrehel et Abecassis, 1985; Ait Mouh, 1989). Par contre, les autres gliadines (α , β , δ) sont thermo-coagulables (Guezlane *et al.*, 1998). Ces auteurs ont suggéré d'utiliser le rapport ω -gliadines/gliadines thermo-coagulables comme marqueur de l'intensité du traitement thermique subi par le couscous pendant la précuisson.

Après la cuisson à la vapeur pendant 10min, la polymérisation de la gluténine a été principalement attribuée à l'interaction des gliadines de type α/β avec la gluténine, à l'exception des ω -gliadines qui n'ont pas de résidus de cystéine (Deng *et al.*, 2008).

Guezlane (1993) a montré que la dénaturation hydrothermique des protéines crée une structure rigide et retarde la gélatinisation de l'amidon en limitant le gonflement de l'amidon. De même, Wang *et al.* (2016) ont noté que la polymérisation du gluten survient principalement pendant la cuisson à la vapeur, et le réseau de protéines est plus susceptible de restreindre le gonflement de l'amidon.

1- Matériel d'étude

L'étude est réalisée en utilisant :

Une semoule extra issue d'un blé d'importation et une semoule courante issue d'un blé local. Les deux semoules proviennent de l'unité Labelle (Ouled Moussa Boumerdes).

1-1-Préparation des couscous

Les couscous sont préparés dans des conditions d'hydratation différentes (figure 9). Les semoules de blé dur utilisées sont d'abord tamisées dans un tamis afin d'enlever les impuretés.

1500g de semoules sont tamisés dans un tamis d'ouverture 630 μ m pour séparer la semoule grosse et la semoule fine.

Le couscous est roulé à la main dans une terrine en bois. Les conditions d'hydratation diffèrent par : le taux d'hydratation et la température de l'eau d'hydratation comme suit :

- Différents taux d'hydratation : 32%, 34%, 36% 38% et 40% sont appliqués. L'échantillon 32% n'est pas pris en considération car le rendement en couscous obtenu est trop faible. De même, l'essai 40% est aussi éliminé suite à la difficulté du roulage du couscous.
- Pour l'étude de l'influence de la température on a fixé le taux d'hydratation à 38% chaque roulage et on a utilisé de l'eau d'hydratation à des températures différentes: 0°C- 22°C- 40°C.

Au début du roulage, la semoule grosse est hydratée, au fur et à mesure, par des quantités d'eau distillée mesurées selon les taux d'hydratation prédéfinies et l'humidité initiale de la semoule. On intercale l'eau par des quantités de semoule fine jusqu'à épuisement de la mesure d'eau et de la semoule fine.

La durée de roulage est de 15min pour tous les échantillons. Le mélange obtenu est tamisé par un tamis à une ouverture des mailles 2900 μ m. Le refus de ce tamis constitue les grumeaux. Le passage est tamisé à travers un autre tamis d'ouverture 1250 μ m afin de bien former les granules de couscous. Puis le produit est tamisé par un troisième tamis 1000 μ m. Le refus de ce tamis constitue le couscous et le passage c'est de la semoule non agglomérée. Les

produits des différentes étapes sont pesés pour établir le rendement en couscous après roulage. Les couscous obtenus sont cuits à la vapeur d'eau dans un couscoussier d'un diamètre de 16cm. Une fois cuit le couscous est démotté à la main et tamisé par un tamis à ouvertures 1800 μ m. Le couscous est séché dans une chambre aérée à la température ambiante et à l'abri du soleil sur un linge propre pendant 2 jours.

Des échantillons de couscous sont prélevés après chaque étape du procédé de fabrication (le roulage, la précuisson et le séchage). Ces échantillons sont immédiatement congelés à -28°C, lyophilisés et broyés avec un broyeur de laboratoire. Ils sont utilisés pour les analyses biochimiques.

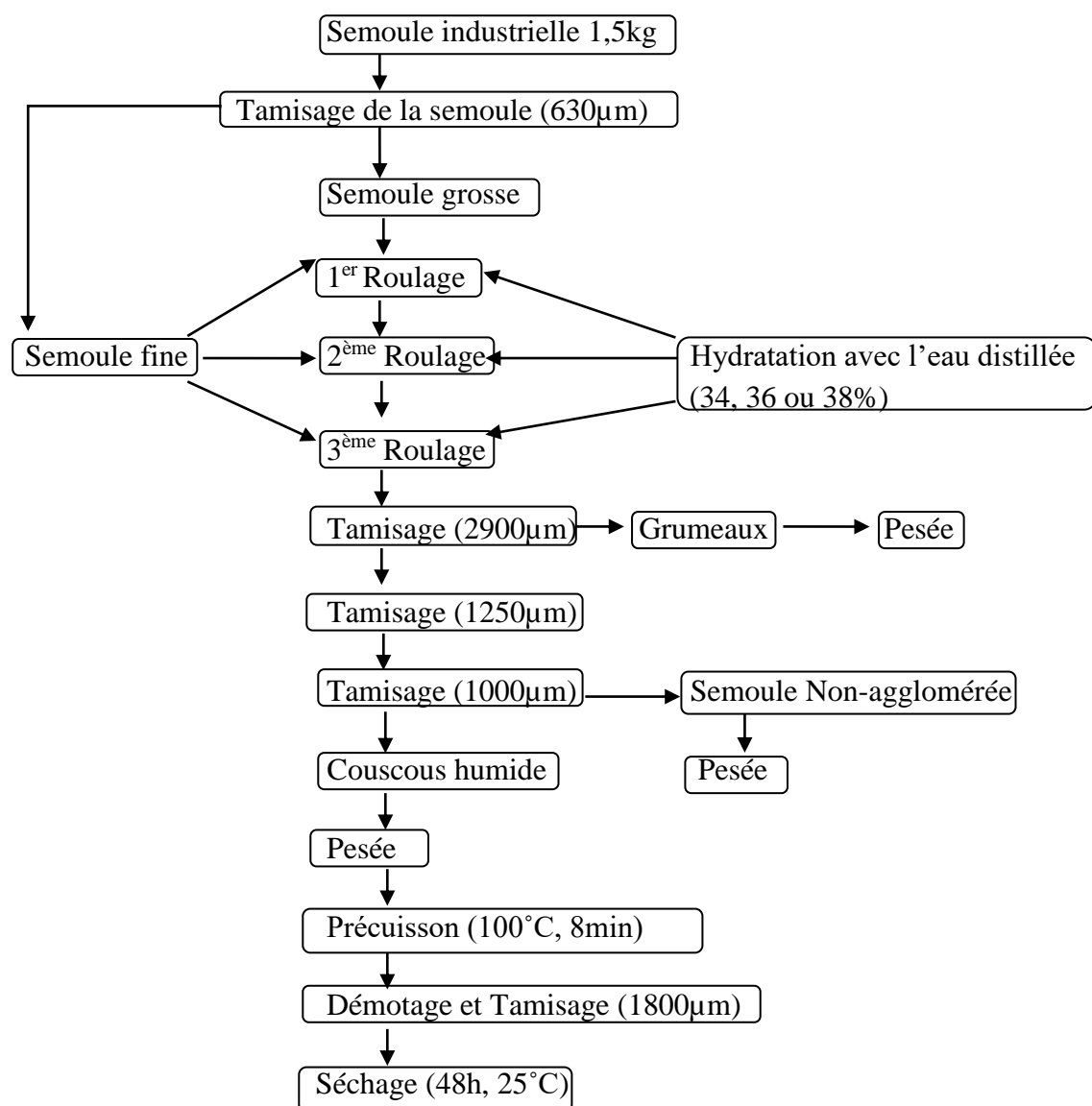


Figure 9 : Diagramme de fabrication des Couscous (Lefkir *et al.*, 2017)

2- Méthodes d'analyse

2-1- Analyses physico-chimiques

2-1-1- Dosage de l'humidité

La teneur en eau est déterminée par séchage dans une étuve Chopin réglée à 130°C pendant une heure et trente minutes sur 5 grammes de produit (AFNOR V03-707).

2-1-2- Dosage des protéines

La teneur en protéines est déterminée selon la méthode de Kjeldhal. La minéralisation est réalisée sur 1g de produit en présence d'acide sulfurique concentré, l'ammoniac libéré par l'addition de la soude et dosé par titrimétrie. Le coefficient de conversion de l'azote en protéines est de 5,7 (AFNOR V03-050).

2-1-3- Taux de cendre

Le taux de cendre est déterminé après incinération de 5 g de produit à 900°C pendant 90min (AFNOR V03-720).

2-1-4- Dosage des lipides totaux

Les lipides totaux ont été obtenus par extraction avec de l'hexane (AFNOR V03-713), à l'aide d'un extracteur (SOXLHET).

2-2- Analyses technologiques

2-2-1- Teneur en gluten sec et en gluten humide

La teneur en gluten sec et humide est déterminée à l'aide du GLUTOMATIC en présence d'une solution saline (5g/l).

Teneur en gluten humide

$$\text{La teneur en gluten humide} = \frac{\text{Poids du gluten humide}}{10} \times 100$$

(% mh)

Teneur en gluten sec

La quantité du gluten sec est calculée après dessiccation du gluten humide à 150°C pendant 4min.

$$\text{La teneur en gluten sec} = \frac{\text{Poids de gluten sec}}{10} \times 100$$

(% ms)

2-2-2- Détermination de la coloration

Les indices de brun (I.B) et de jaune (I.J) sont déterminés à l'aide d'un Chromamètre (Minolta CR-410 illuminant D65). Ces conditions sont celles retenues par la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E). Les résultats sont exprimés en fonction du système d'unité de mesure C.I.E (L, a, b). L'échantillon de couscous ou de semoule (épaisseur = 2,5mm) est placé sous la source lumineuse.

L'indice de jaune correspond à la valeur (b) et il est d'autant plus élevé que le couscous ou la semoule est plus jaune. L'indice de brun correspond à la valeur (100-L) et il augmente avec le brunissement.

2-2-3- Analyse granulométrique

Elle est déterminée par tamisage d'un échantillon de 100g au moyen d'un Rotachoc Chopin pendant 10 minutes et les refus de chaque tamis sont pesés.

Ouvertures des mailles des tamis utilisés :

Pour les semoules : 630µm, 450µm, 350µm, 250µm, 150µm.

Pour les couscous : 1400µm, 1250µm, 1000µm, 800µm, 360µm.

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

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

D50 : Diamètre équivalent moyen (µm).

Sg : Ecart type géométrique ($D84/D50 = D50/D16$).

D50 : Diamètre des particules à 50% de probabilité.

D84 : Diamètre des particules à 84% de probabilité.

D16 : Diamètre des particules à 16% de probabilité.

2-2-4- Mixographe

L'essai au mixographe est déterminé selon la norme AACCC 54-40 A (1983). Il permet d'établir des relations entre consistance et teneur en eau des pâtes. Il constitue un test intéressant pour la détermination des propriétés rhéologiques de la pâte.

10g de semoule sont hydratés en fonction de la teneur en protéines selon la formule suivante :

$$Y=1,5X+43,6$$

Y : Pourcentage d'absorption d'eau ;

X : Teneur en protéine (% ms).

Le pétrissage s'effectue pendant 8 minutes dans le bol du mixographe. L'enregistrement des paramètres du graphique se fait à l'aide d'un traceur posé sur la base de la feuille d'enregistrement. Les paramètres étudiés sont :

- Temps de développement de la pâte (temps de pétrissage), exprimé en minutes, qui caractérise la force de la pâte ;
- Hauteur de la courbe au pic maximum, donnée en % ; correspond à la viscosité de la pâte ;

Le calcul des paramètres est effectué selon la figure 10.

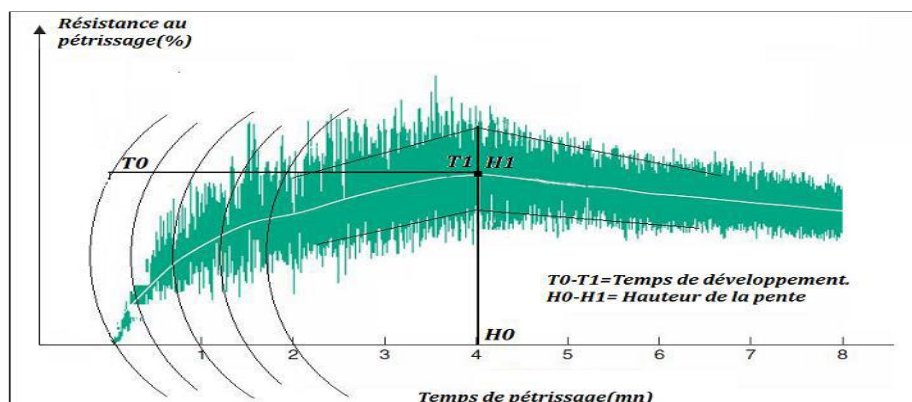


Figure 10 : Mixogramme d'un blé dur à gluten fort

2-3- Méthodes d'appréciation de la qualité culinaire des couscous

2-3-1- Capacité d'hydratation du couscous (gonflement)

La capacité d'hydratation du couscous est estimée selon la méthode de Guezlane et Abecassis (1991). 20g de produit cru (pesés à 0,1g près) sont versés dans une éprouvette graduée de 100ml à col rodé (hauteur 25cm ; diamètre 3cm) contenant 50ml d'eau distillée (25°C et à 100°C). L'éprouvette est bouchée et 10 retournements successifs sont effectués de manière à bien hydrater l'ensemble des particules. 50ml d'eau sont ajoutés à nouveau pour faire descendre les particules restées le long de la paroi de l'éprouvette. Celle-ci est laissée au repos et les volumes du couscous après 5, 10, 20, 30, 40, 50, et 60 minutes sont notés. L'indice de gonflement (G) par la relation suivante :

$$G (\%ms) = 100 (VF/\text{prise d'essai})$$

VF : Volume final

2-3-2- Prise en masse du couscous cuit

La prise en masse est déterminée par tamisage après préparation du couscous suivant la méthode rapide de Guezlane (1993).

10g de couscous sec sont placés dans un cristallisateur et hydratés avec 16,5ml d'eau distillée salée à 5g/l. Après addition d'eau, le cristallisateur est immédiatement recouvert d'une membrane de paraffine et placé avant analyse pendant 12 minutes dans une étuve maintenue à 90°C.

Après cuisson, on procède au séchage qui consiste à placer le produit cuit dans une étuve ventilée pendant 4 heures à 95°C de manière à ramener la teneur en eau du produit à 12% de matière humide.

La prise en masse réalisée sur un tamis d'ouverture égale à 3150 μ m est évaluée par la détermination de l'indice de prise en masse par tamisage (IPMT).

Selon Guezlane et Abecassis (1991, l'indice de prise en masse par tamisage (IPMT) est défini par la relation suivante.

$$IPMT (\%) = 100 (\text{refus à } 3150\mu\text{m}/\text{prise d'essai}).$$

2-3-3- Degré de délitescence

La délitescence est évaluée selon la méthode de Yettou *et al.* (2000). La préparation consiste en une cuisson rapide des échantillons de couscous selon la méthode de cuisson rapide décrite par Guezlane et Abecassis (1991). 10g de couscous cuits sont placés dans un bécher de 200ml. 50ml d'eau distillée à 25°C sont ajoutés et après une agitation durant 6 minutes par un agitateur magnétique; le surnageant est récupéré par filtration sur un tamis d'ouverture de maille 1000µm. Une partie aliquote de 10ml est séchée dans l'étuve à 100°C pendant 15 heures.

Le degré de délitescence (DD%) exprimé pour 100g de matière sèche (couscous sec étudié) est donné par la relation :

$$DD (\% \text{ ms}) = \frac{ES \times V \times M}{10(100-H)} \times 100$$

ES : Poids de l'extrait sec (en g);

V : Volume finale de l'eau de cuisson (en ml) ;

M : Poids du couscous après cuisson (en g) ;

H : teneur en eau du couscous (en % mh).

2-3-4- Indice de solubilité dans l'eau

Les indices de solubilité dans l'eau sont mesurés selon méthode de Kite *et al.* (1957), modifiée par Anderson *et al.* (1969). La solubilité de l'amidon dans l'eau permet d'apprécier certaines transformations subies par les grains d'amidon. L'indice de solubilité de l'amidon (I.S) dans l'eau permet d'apprécier son degré de gélatinisation.

Un échantillon de couscous (2,5g ± 0,1g) est placé dans un tube de centrifugation de 50ml contenant 30ml d'eau distillée, placé sur un support rotatif à température ambiante pendant 45min, puis centrifugé à 3000xg pendant 10min. Le surnageant est séparé du culot et séché à 100°C pendant 17 heures à l'étuve. L'extrait sec obtenu est pesé et donne l'indice de solubilité défini par le poids de substances dissoutes de l'échantillon.

$$I.S (\% \text{ ms}) = \frac{\text{Moyenne de l'extrait sec}}{\frac{2,5(100-H)}{100}} \times 100$$

H: Teneur en eau

2-4- Modifications biochimiques

2-4-1- Indice de gonflement des gluténines (IGG)

La détermination de l' indice de gonflement des gluténines permet d'évaluer la qualité des protéines des semoules et des farines. Le test de gonflement des gluténines est réalisé à l'aide de l'appareil Thermomixer, selon la méthode proposé par Wang et Kovacs (2002).

40mg de semoule/couscous sont pesés dans un Eppendorf de 1,5ml et 0,6ml d'eau distillée est ajoutée. Les tubes rapidement bouchés et mélangés sont vortexés pendant 5 secondes. Les tubes sont placés dans un Thermomixer et centrifugés à 1400 rpm pendant 20 min à 25°C. Une solution (0,6ml) SDS-acide lactique (SDS-LA) est ajoutée. La solution SDS-LA est préparée selon la Méthode approuvée 56-70 (AACC 2000). Le mélange vortexé pendant 5 secondes est placé à nouveau dans le Thermomixer à 1400 tpm pendant 20min et centrifugé à 300x g pendant 2min. Le surnageant est éliminé à l'aide d'une seringue. Les tubes Eppendorf sont pesés, et le SIG est calculé selon la formule suivante.

$IGG = \text{poids du culot gonflé} / \text{poids de la prise d'essai}$

2-4-2- Electrophorèse des protéines en gel de polyacrylamide en présence de dodécyl sulfate de sodium (SDS-PAGE)

Les protéines complexées au SDS acquièrent une charge négative uniforme et sont séparées uniquement en fonction de leur taille moléculaire. La technique utilisée est celle mise au point par Laemmli (1970), modifiée par Payne *et al.* (1979) et Autran et Berrier (1984).

Extraction des protéines

Les protéines sont extraites à partir de 50mg de semoule ou de couscous par 0,8 ml d'une solution extractrice contenant 2% de SDS, 12,05ml Tris-HCl pH 6,8, 10% de glycérol et 0,01% de pyronine G pendant 2 heures à la température ambiante. La réduction des protéines est obtenue en plongeant les échantillons dans un bain marie d'eau bouillante pendant 2,5min. Après centrifugation 5min à 15000xg, 10µl de surnageant sont déposés à l'aide d'une micropipette.

L'électrophorèse est réalisée avec un appareil Thermo Scientific Owl P10DS. Les gels de polyacrylamide (10cm x 10cm x 1mm) contiennent de l'acrylamide + Bisacrylamide 12,5%. La migration a duré 2h en tampon tris-glycine de pH 8,4 sous une intensité constante

de 30mA avec un DDP de 200V pour les 2 plaques. Les gels sont colorés avec du bleu brillant de Coomassie R-250 pendant une nuit.

2-4-3- Fractionnement par solubilité différentielle et dosage des différentes fractions protéiques

Le fractionnement des protéines est réalisé selon le procédé (figure 11).

100mg de semoule/couscous sont mis en suspension à l'aide d'une baguette de verre dans 1 ml d'une solution de propanol-1 à 7,5% contenant 0,3M NaI. Après agitation au vortex pendant 30 minutes on procède à une centrifugation à 2200xg pendant 3 minutes. L'extraction est réalisée en deux fois.

Après chaque centrifugation, les surnageants sont récupérés soit (S1 et S2). Le culot C2 résultant de la 2^{ème} centrifugation est remis en suspension à l'aide d'une baguette de verre dans la même solution en vortexant pendant 1 minute puis centrifugation à 15000xg pendant 5 minutes. Le surnageant S3 obtenu est combiné aux surnageants S1 et S2.

Les trois surnageants (S1+S2+S3), constituent les protéines monomériques et leur teneur en protéine est déterminée par la méthode de turbidimétrie.

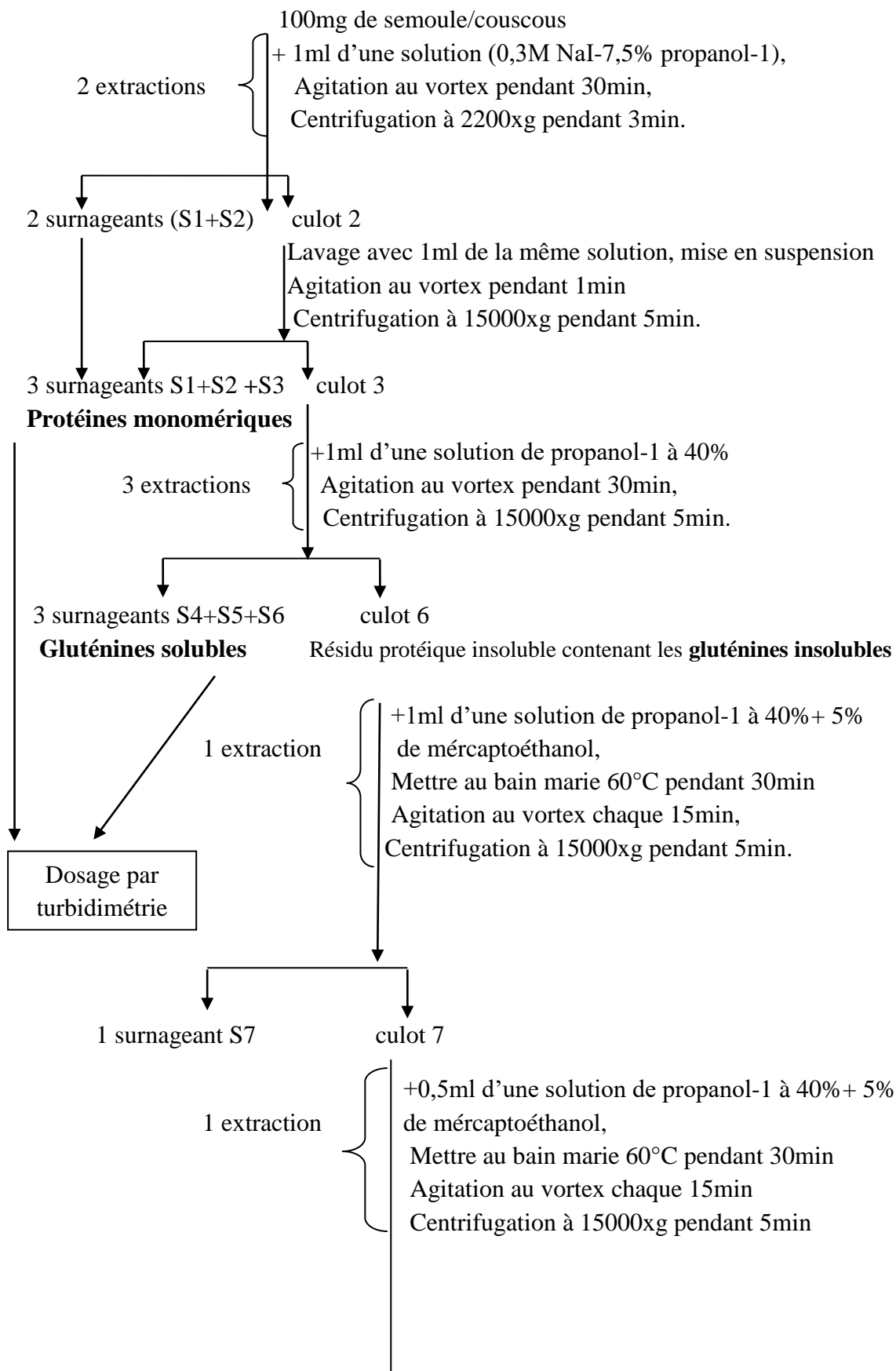
Le culot résultant C3 est extrait trois fois de suite par 1 ml d'une solution de propanol-1 à 40% avec agitation pendant 30 minutes au vortex après leur remise en suspension à l'aide d'une baguette en verre, chaque extraction est suivie d'une centrifugation à 15000xg pendant 5 minutes.

Les trois surnageants (S4+S5+S6) obtenus sont combinés et utilisés pour le dosage des protéines par la méthode de turbidimétrie. Cette fraction constitue les gluténines solubles.

Le culot C6 résultant est extrait trois fois de suite avec 1ml, 0,5ml et 0,25ml d'une solution de propanol-1 à 40% contenant 5% de mércaptoéthanol au bain marie à 60°C pendant 30min. Chaque extraction est suivie d'une centrifugation à 15000xg pendant 15 minutes.

Les trois surnageants obtenus (S7+S8+S9) sont combinés, ils représentent les gluténines insolubles dont les teneurs en protéines sont dosées par la méthode de turbidimétrie.

Le culot C9 représente le résidu protéique insoluble.



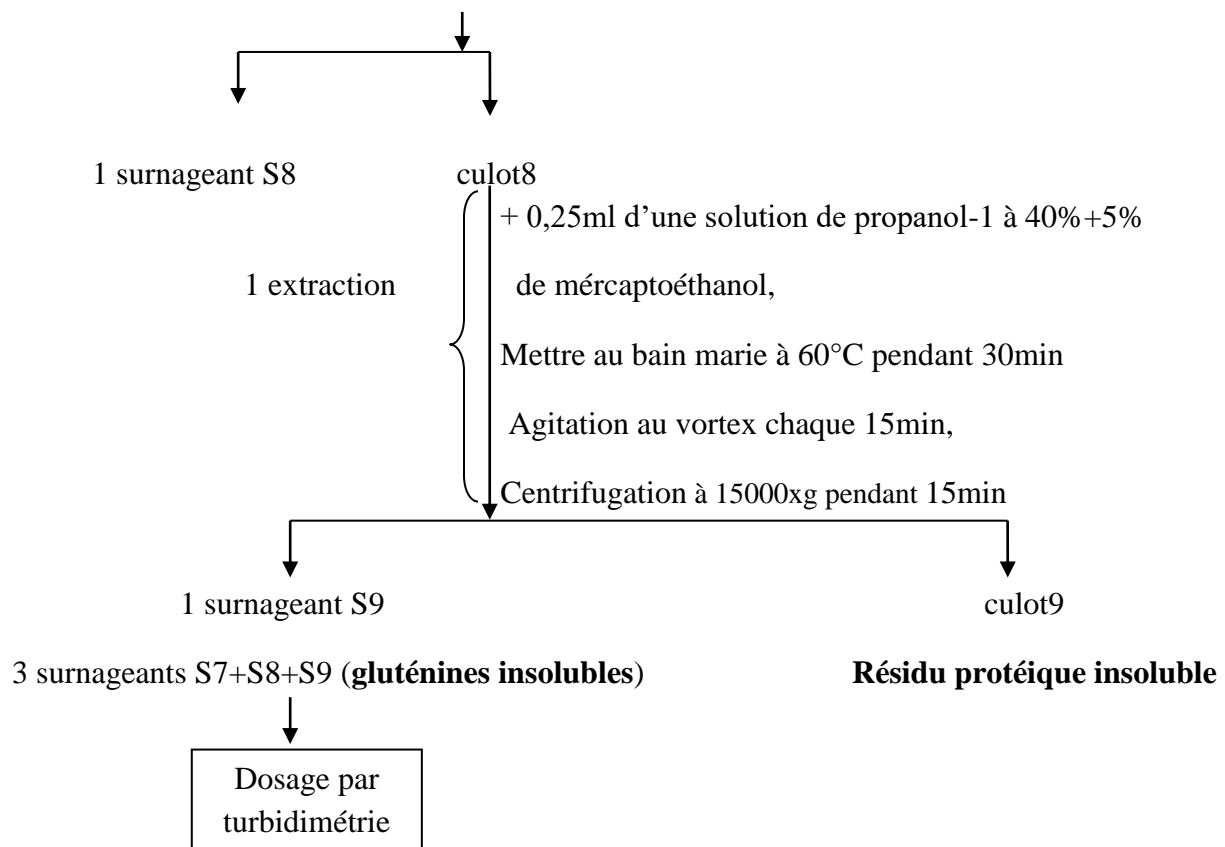


Figure 11 : Fractionnement séquentiel des protéines par combinaison de la méthode de Fu et Kovacs (1999) et la méthode de Wang et Kovacs (2002)

Les différentes fractions protéiques (protéines monomériques, gluténines solubles, gluténines insolubles) sont déterminées en mesurant la turbidité du précipité protéique avec de l'acide trichloroacétique par la méthode de Choi *et al.* (1993).

2-5-Optimisation des conditions d'hydratation du couscous

La démarche d'optimisation par la technique du plan d'expériences suivie durant cette étude consiste à :

- Préparer une matrice expérimentale selon le plan expérimental complet à trois facteurs et chaque facteur est caractérisé par deux niveaux, soit un plan de 2^3 caractérisé par l'élaboration de 8 échantillons : E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7 et E8.
- Définir le modèle mathématique qui sera utilisé pour approcher la relation existante entre les réponses sélectionnées, à savoir le rendement (Y_1), la délitescence (Y_2), l'IPMT(Y_3), l'indice de solubilité (Y_4), l'indice de brun (Y_5), l'indice de jaune (Y_6), le

gonflement à froid (Y_7), le gonflement à chaud (Y_8), la D50 (Y_9) et le Sg (Y_{10}) et les facteurs sélectionnés, à savoir le taux d'hydratation (X_1), la température (X_2) et la nature de la semoule (X_3).

- Valider le modèle mathématique en se basant sur les caractéristiques statistiques calculées par le logiciel SATGRAPHICS Centurion XVII.
- Rechercher les conditions opératoires optimales conduisant à l'optimisation de l'influence du taux d'hydratation, de la température de l'eau d'hydratation et de la semoule mise en œuvre.

2-6- Méthodes statistiques

Le traitement des données fait appel à des méthodes statistiques. Les variables statistiques (test de comparaison de moyennes, analyse de la variance et les analyses de corrélations simples) sont calculées à l'aide du logiciel STATISTICA version 10.0.

L'analyse de la variance permet, suivant le niveau de significativité, de déterminer l'influence des facteurs étudiés ou des interactions entre facteurs. La probabilité inférieure à 0,001 donne un effet très hautement significatif (noté ***), à 0,01 un effet hautement significatif (noté **), à 0,05 un effet significatif (noté *) et pour une probabilité supérieure à 5% on considère que l'effet n'est pas significatif (noté NS).

Chapitre I : Etude de la matière première

1-1- Caractéristiques des semoules

La qualité physicochimique et technologique des semoules étudiées est évaluée sur la base de la mesure des teneurs en protéines totales, des teneurs en lipides, des teneurs en cendres, des teneurs en gluten sec et en gluten humide, de la coloration (IJ et IB), des caractéristiques granulométriques (D50 et Sg) et des essais au mixographe.

1-1-1- Teneur en protéines des semoules

Les protéines représentent 8 à 18% de matières sèches du blé. Cette teneur dépend des conditions agroclimatiques de développement de la plante et des variétés cultivées (Feillet, 2000). Les protéines de la semoule jouent un rôle important dans la qualité des produits céréaliers à la fois par leurs teneurs et par leurs propriétés fonctionnelles (Dick et Matsuo, 1988). De nombreux auteurs et notamment Dexter et Matsuo (1977), Feillet (1986) et Abecassis *et al.* (1990) ont souligné le rôle prépondérant de la teneur en protéines dans l'expression de la qualité culinaire des pâtes alimentaires.

Les résultats des teneurs en protéines des semoules sont regroupés dans le tableau 1. Les teneurs en protéines sont de 15,37%ms et 16,21%ms pour la semoule courante et la semoule extra respectivement. On note d'après ces résultats que la teneur en protéines est fonction de la nature de la semoule. Test de comparaison de moyennes (test de Student) (tableau 2) met en évidence un effet significatif ($p < 0,05$) de la semoule sur la teneur en protéines. La différence de la teneur en protéines des différents échantillons peut être expliquée aussi par la granulométrie de la semoule. En effet, la semoule extra, qui est plus fine que la semoule courante, présente la teneur la plus élevée. Djema (2000) a souligné que les semoules fines présentent des teneurs en protéines plus élevées que les semoules grosses et intermédiaires. De même Boyacioglu et Unal (1992) ont observé une diminution de la teneur en protéines avec l'augmentation de la granulométrie des semoules. Une corrélation significative négative est observée entre la teneur en protéines et la D50 ($r = -0,84$ à $p < 0,05$) (tableau 3).

1-1-2- Teneur en lipides des semoules

Les lipides sont des composés biochimiques clés du blé et ont une incidence sur la qualité culinaire du produit fini (Laignelet, 1983). Ounane *et al.* (2006) ont montré que la qualité culinaire du couscous est partiellement liée à la teneur et à la composition des lipides.

Les résultats de la teneur en lipides des semoules étudiées sont mentionnés dans le tableau 1. Il en ressort que les valeurs de cette teneur varient de 1,075%ms à 0,746%ms pour la semoule courante et la semoule extra respectivement. D'après ces résultats la semoule courante présente une teneur en lipides plus élevée que celle de la semoule extra. Le test de Student (tableau 2) fait ressortir un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur la teneur en lipides

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques et technologiques des semoules

		Semoule courante	Semoule extra
Teneur en protéines (%ms)		15,37±0,24	16,21±0,34
Teneur en lipides (%ms)		1,075±0,005	0,746±0,003
Teneur en cendres (%ms)		0,697±0,004	0,664±0,003
Teneur en gluten sec (%ms)		7,16±0,15	8,56±0,21
Teneur en gluten humide (%mh)		19,73±0,7	25±0,17
Coloration	Indice de jaune (b)	28,49±0,22	32,77±0,67
	Indice de brun (100-L)	26,51±0,64	26,97±1,71
D50 (µm)		341,67±2,88	318,33±2,89
Sg		1,27±0,014	1,34±0,006
Temps de développement de la pâte (min)		3,95±0,05	3,88±0,13
Hauteur de la pente (%)		60,5±0,5	58±1

Tableau 2 : Test de comparaison de moyennes (test de Student) des différentes caractéristiques des semoules

	Moyenne	Minimum	Maximum	Ec-Type	Coefficient de variation	Effet semoule
Teneur en protéines (%ms)	15,79	15,1	16,51	0,52	3,32	*
Teneur en lipides (%ms)	0,91	0,74	1,08	0,18	19,8	***
Teneur en cendres (%ms)	0,68	0,66	0,7	0,02	2,66	***
Teneur en gluten sec (%ms)	7,87	7	8,8	0,78	9,97	***
Teneur en gluten humide (%mh)	22,37	19	25,1	2,92	13,06	***
Temps de développement de la pâte (min)	3,91	3,75	4	0,09	2,41	NS
Hauteur de la pente (%)	59,25	57	61	1,54	2,6	*
D50 (µm)	330	315	345	13,04	3,95	***
Sg	1,31	1,26	1,34	0,04	2,72	**
Indice de brun	26,74	25,93	28,94	1,18	4,41	NS
Indice de jaune	30,63	28,25	33,18	2,38	7,79	***

*: Significatif à $p < 0,05$

**: Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

1-1-3- Teneur en cendres des semoules

La teneur en cendres définit le pourcentage de matières minérales présent dans la semoule. Elles permet de contrôler la pureté des produits de mouture (Feillet, 2000). La mesure de la teneur en cendres a un intérêt essentiellement réglementaire et permet de classer les farines et les semoules (Bar, 2001).

Les résultats de la teneur en cendres sont rassemblés dans le tableau 1, ils varient entre 0,697%ms et 0,664%ms pour la semoule courante et la semoule extra respectivement. La valeur la plus faible est celle de la semoule extra par rapport à la semoule courante. D'après Abecassis et Feillet (1985), cette différence est attribuée à l'origine génétique et aux conditions pédoclimatiques.

Le test de Student (tableau 2) fait apparaitre un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur le taux de cendres.

1-1-4- Teneurs en gluten sec et en gluten humide des semoules

L'Appréciation de la quantité et de la qualité du gluten présente un intérêt principalement technique. En effet, le gluten, constitué essentiellement par la fraction insoluble des protéines, présente la caractéristiques de pouvoir former un réseau viscoélastique dont les propriétés d'extensibilité, d'élasticité et de ténacité ont une influence sur le comportement des pâtes en cours de fabrication et sur la qualité du produit fini (Bar, 2001).

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 1. La teneur en gluten sec varie entre 7,16%ms et 8,56%ms pour la semoule courante et la semoule extra respectivement. La valeur la plus faible est enregistrée par la semoule courante par rapport à la semoule extra. La teneur en gluten humide fluctue entre 19,73%mh et 25%mh pour la semoule courante et la semoule extra respectivement. La teneur en gluten humide de la semoule courante est faible par rapport à celle de la semoule extra. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la semoule extra est plus fine que la semoule courante. Nos résultats corroborent ceux trouvés par Djema (2000), qui montrent que les teneurs en gluten humide et en gluten sec augmentent avec la diminution de la granulométrie de la semoule. En effet, des corrélations significatives négatives (tableau 5) ont été notées entre la teneur en gluten humide et en gluten sec et la D50 ($r = -0,96$ et $r = -0,92$ à $p < 0,05$)

Le test de Student (tableau 2) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur la teneur en gluten sec et en gluten humide.

L'analyse des résultats fait ressortir que la teneur en gluten humide et la teneur en gluten sec augmentent avec l'accroissement de la teneur en protéines. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Malcolmson *et al.* (1993). Des corrélations positives et significatives (tableau 3) ont été notées entre la teneur en gluten humide, la teneur en gluten sec et la teneur en protéines ($r=0,85$ et $r=0,84$ à $p < 0,05$ respectivement), et une corrélation significative positive entre la teneur en gluten sec et la teneur en gluten humide ($r=0,95$ à $p < 0,05$).

1-1-5- Coloration des semoules

La coloration est un facteur déterminant de la qualité organoleptique des semoules. Elle est considérablement influencée par les caractéristiques des blés mis en œuvre (teneur en pigment caroténoïdes et en lipoxgénases) et les conditions de mouture.

L'analyse des résultats du tableau 1 montre que l'indice de jaune des différentes semoules varie de 28,49 pour la semoule courante à 32,77 pour la semoule extra. Ils montrent que l'indice de jaune de la semoule extra est plus élevé que celui de la semoule courante. Pour l'indice de brun, les valeurs sont comprises entre 26,51 pour la semoule courante et 26,97 pour la semoule extra.

Le test de Student (tableau 2) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur l'indice jaune et un effet non significatif sur l'indice de brun.

1-1-6- Granulométrie des semoules

La distribution granulométrique de la semoule est un facteur déterminant du fait qu'elle affecte les propriétés d'absorption des pâtes et par conséquent elle influe sur la qualité des produits finis (Dick et Matsuo, 1988).

Les résultats de la granulométrie sont présentés dans le tableau 3 et illustrés par la figure 12. D'après le tableau 1 on remarque que la D50 varie de 318,33 μm pour la semoule extra à 341,67 μm pour la semoule courante. La semoule extra est donc plus fine que la semoule courante.

Le test de Student (tableau 2) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur la D50.

Les résultats du paramètre de dispersion (Sg) sont regroupés dans le tableau 1. Ils varient de 1,27 pour la semoule courante à 1,34 pour la semoule extra. La semoule courante est donc, plus homogène que la semoule extra.

Le test de Student (tableau 2) met en évidence un effet hautement significatif ($p < 0,01$) de la semoule sur le paramètre de dispersion.

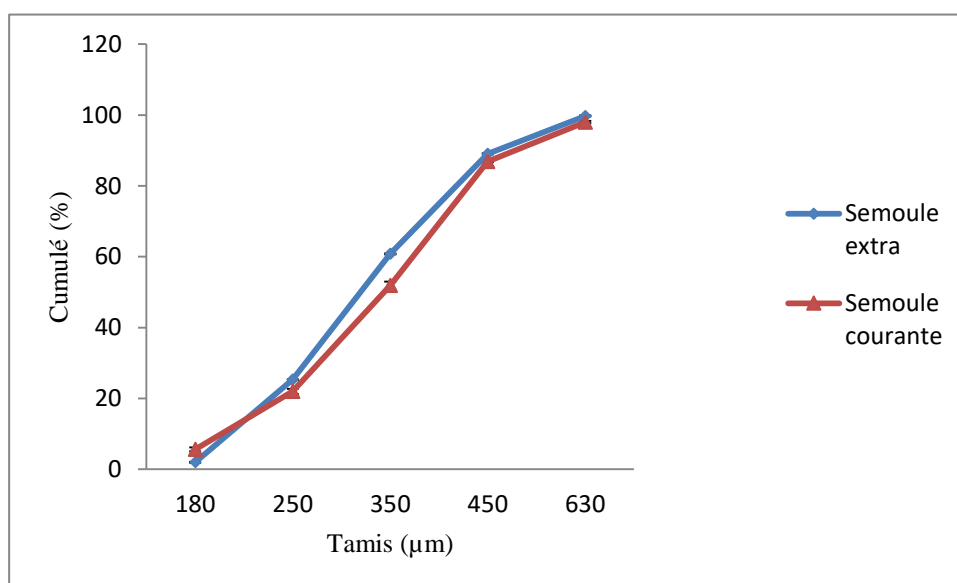


Figure 12 : Courbes granulométriques des semoules

1-1-7- Essais au Mixographe

L'essai au mixographe permet de déterminer quelques propriétés rhéologiques de panification et de pastification des semoules issues de blé dur en mettant en évidence en particulier la force du gluten.

Les résultats du mixographe sont représentés dans le tableau 1. Les valeurs du temps de développement de la pâte (TDP) varie de 3,95min à 3,88min pour la semoule courante et la semoule extra respectivement. D'après ces résultats on constate donc que la force de la semoule courante est comparable à celle de la semoule extra. En effet, le test de Student (tableau 2) fait apparaître un effet non significatif de la semoule sur le temps de développement de la pâte (TDP).

En ce qui concerne la hauteur de la pente (HP), la valeur de la semoule courante est de 60,5% et celle de la semoule extra de 58%. De ce fait, la semoule courante possède une viscosité légèrement plus élevée que la semoule extra. Le test de Student (tableau 2) met en évidence un effet significatif ($p < 0,05$) de la semoule sur la hauteur de la pente (HP).

Tableau 3 : Matrice des corrélations des caractéristiques physico-chimiques et technologiques des semoules

	Teneur en Protéines	D50	Sg	Gluten Sec	Gluten Humide	Indice de Brun	Indice de Jaune	Teneur en lipides	Taux de cendres
Teneur en Protéines									
D50	-0,84*								
Sg	NS	-0,93*							
Gluten Sec	0,84*	-0,93*	0,92*						
Gluten Humide	0,85*	-0,97*	0,98*	0,95*					
Indice de Brun	NS	NS	NS	NS	NS				
Indice de Jaune	0,85*	-0,94*	0,98*	0,98*	0,98*	NS			
Teneur en lipides	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
Teneur en cendres	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

*: Significatif à $p < 0,05$

NS : Non significatif.

Chapitre II : Influence des conditions d'hydratation sur la qualité du couscous

2-1- Rendements de l'opération de roulage et facilité de roulage

Le roulage est l'opération durant laquelle l'agglomération des particules de la semoule hydratées forme des grains de couscous. Au cours de l'agglomération, les particules natives de la semoule sont réunis pour former des particules plus grandes, appelées les agglomérats (Rondet *et al.*, 2016).

Les conditions de roulage sont très importantes car elles déterminent le rendement final en couscous du procédé de fabrication. En effet, les semoules non agglomérées et les grumeaux sont obligatoirement recyclés. La maîtrise de l'opération de roulage est un des éléments clefs de la productivité du processus de fabrication. Selon Abecassis *et al.* (2012), l'étape de l'hydratation et de l'agglomération du couscous est stratégique car elle contrôle directement les performances des lignes de production.

2-1-1- Influence du taux d'hydratation

Les résultats des rendements de l'opération de roulage en fonction du taux d'hydratation sont regroupés dans la figure 13.

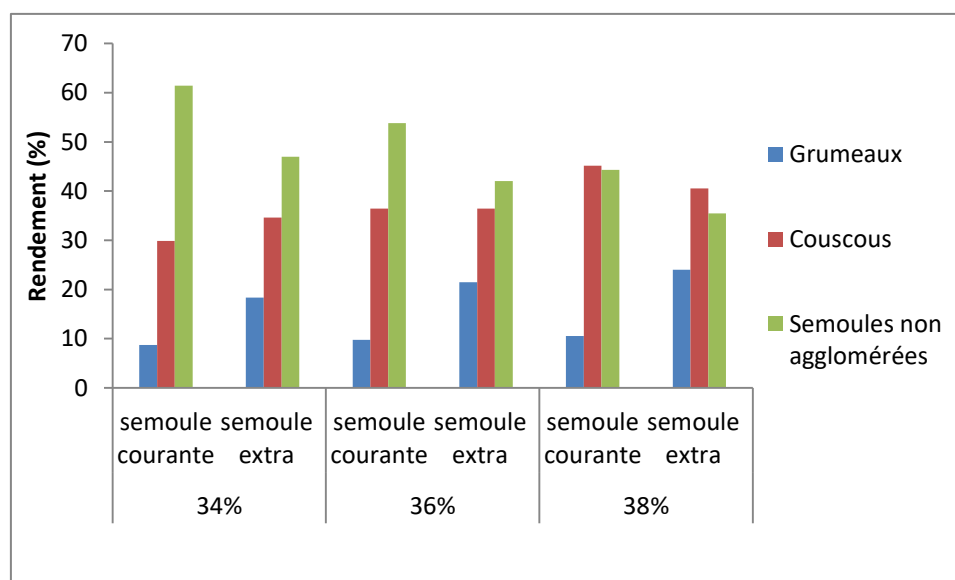


Figure 13 : Influence du taux d'hydratation sur les rendements de l'opération de roulage

L'analyse de la figure 13 montre que les rendements en couscous et en grumeaux augmentent avec l'accroissement du taux d'hydratation alors que les rendements en semoules non agglomérées sont d'autant plus faibles que le taux d'hydratation est élevé. Ces résultats sont en accord avec ceux de Guezlane (1993) qui a noté que l'accroissement du taux d'hydratation des semoules engendre une augmentation sensiblement égale des fractions moyennes et grosses. D'après Guezlane (1993), le paramètre le plus influent sur le rendement de l'opération de roulage est le taux d'hydratation des semoules. En effet, une hydratation insuffisante a pour effet de diminuer de manière très importante le taux de roulage au profit des fractions fines. De même, Saad *et al.* (2011) et Barkouti *et al.* (2012) ont noté que l'augmentation du taux d'hydratation induit une croissance significative des particules plus grosses. Cette étape peut en effet générer des quantités importantes de produits à recycler (trop gros ou trop petits) qui représentent des flux jusqu'à 2,5 fois supérieurs aux flux de la semoule native (Abecassis *et al.*, 2012).

Dans une étude réalisée sur le mécanisme d'agglomération de la semoule de blé dur, Saad *et al.* (2011) ont fait varier la teneur en eau de 0,15g/g ms à 0,7g/g ms et ont montré que le mécanisme d'agglomération de la semoule passe par 3 étapes successives (nucléation, coalescence et formation de pâte) selon la quantité d'eau ajoutée. Ils ont aussi noté que la limite de plasticité se situe à 0,59g/g ms. Dans notre étude, la quantité d'eau ajoutée à la semoule varie de 0,34g/g ms à 0,38g/g ms et ne peut concerner que la nucléation et la coalescence.

La première étape des mécanismes d'agglomération est la nucléation, avec formation de nucléi à partir des particules natives de semoule de blé dur, lorsque les gouttelettes d'eau sont incorporées à la semoule. La nucléation est censée être le mécanisme principal impliqué dans les niveaux d'addition d'eau faible (0,16g/g ms-0,35 g/g ms). Le diamètre apparent du nucléi a été estimé entre 0,6 et 1 mm (Saad *et al.*, 2011). Cette étape correspond dans notre étude au taux d'hydratation 34% où on observe les rendements les plus élevés en semoule non agglomérée (figure 13). Cette dernière n'est pas constituée de particules de semoule native mais de nucléi qui n'ont pas eu assez d'eau pour se transformer en grain de couscous. Durant la nucléation, seuls les mécanismes physiques pourraient se produire instantanément pour stabiliser la structure qui se pose (Saad *et al.*, 2011). Des ponts liquides se créent entre les particules de semoule (Hebrard *et al.*, 2001), ces ponts pourraient être impliqués pour stabiliser la structure interne du nucléi (Saad *et al.*, 2011).

La deuxième étape des mécanismes d'agglomération à l'échelle des grains est la formation et la croissance des agglomérats à partir de nucléi par coalescence. C'est le mécanisme principal impliqué dans les niveaux d'addition d'eau intermédiaire (0,35g/g ms-0,50g/g ms). Le diamètre apparent des agglomérats a été estimé entre 1 et 3 mm (Saad *et al.*, 2011). En comparaison avec notre étude, cette étape correspond aux taux d'hydratation 36% et 38% les rendements en couscous et en grumeaux augmentent avec l'accroissement du taux d'hydratation et le rendement en semoule non agglomérée diminue (figure 13). Le mécanisme de coalescence pourrait être décrit comme la formation de gros grains par l'association de plusieurs nucléi. Il implique des mécanismes physiques d'adhésion entre nucléi et également des changements biochimiques dans lesquels les particules de semoule changent leurs caractéristiques comparativement aux natives (Saad *et al.*, 2011). Selon ces mêmes auteurs, les mécanismes physiques d'adhérence via la formation de ponts capillaires entre nucléi contribuent à la structure interne des agglomérats. Lorsque la coalescence se produit, la teneur en eau du nucléi est alors supposée être suffisamment élevée pour engendrer l'adhérence après contact entre deux nucléi.

Le taux d'hydratation a une influence sur la facilité de roulage (Dahoun-Lefkir, 2005). Nous avons observé durant l'étape de la fabrication du couscous que la facilité de roulage augmente avec l'accroissement du taux d'hydratation. L'augmentation du taux d'hydratation améliore le roulage de la semoule et favorise la formation des grains de couscous par l'agglomération des particules de semoule hydratées. En revanche, l'augmentation du pourcentage des grumeaux constitue une limite à l'élévation du taux d'hydratation des semoules. En effet, Saad *et al.* (2011) et Barkouti *et al.* (2012) ont constaté qu'au-delà d'une certaine limite des agglomérats de taille élevée se forment empêchant la formation de grain de couscous. Dans nos conditions opératoires, la limite du taux d'hydratation est de 38% ; au-delà duquel, le roulage du couscous est difficile.

2-1-2- Influence de la température de l'eau d'hydratation sur le roulage

Les résultats des rendements de l'opération de roulage en fonction de la température de l'eau d'hydratation sont représentés dans la figure 14. Ils montrent que les rendements en couscous sont inversement proportionnels à la température de l'eau d'hydratation. Les semoules roulées avec de l'eau T0°C présentent les meilleurs rendements en couscous par rapport à celles qui ont subi une hydratation avec de l'eau T22°C et T40°C. En revanche, lorsque la semoule est hydratée à différentes températures (0°C, 22°C et 40°C), les

rendements en semoules non agglomérées sont comparables. Pour les grumeaux, les valeurs augmentent au fur et à mesure que la température s'élève. Il ressort de ces résultats que l'utilisation de l'eau à T0°C est favorable à la granulation du couscous puisqu'elle engendre moins de grumeaux. Par contre, l'eau à T22°C et l'eau à T40°C conduisent à la formation de grandes quantités de grumeaux ce qui minimise les rendements en couscous et rend le roulage plus difficile. Selon Hébrard *et al.* (2003) l'augmentation de la température accélère la sorption.

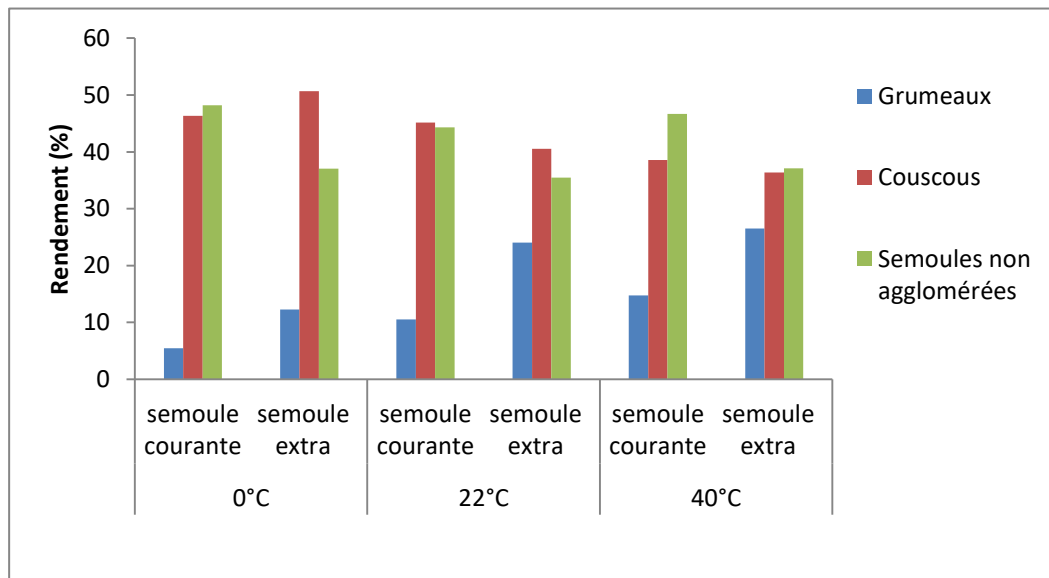


Figure 14 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur les rendements de l'opération de roulage

2-1-3- Influence de la semoule sur le roulage

La comparaison des rendements de l'opération de roulage des différents couscous (figures 13 et 14) montre que ceux-ci dépendent de manière significative de la semoule mise en œuvre et plus spécialement de sa granulométrie. En effet, plus la semoule est fine plus les rendements en semoules non agglomérées sont faibles et plus les pourcentages en grumeaux sont élevés. La granulométrie de la semoule affecte significativement les mécanismes d'agglomération de la semoule. La granulométrie médiane (D50) de la semoule génère un impact important sur les rendements d'agglomérations (Bellocq *et al.*, 2018). Dans notre étude, le calcul des corrélations (Annexe C) montre que la D50 de la semoule est corrélée significativement ($p < 0,05$) et négativement avec le rendement en grumeaux ($r = -0,79$) et significativement ($p < 0,05$) et positivement avec le rendement en semoules non agglomérées ($r = 0,73$).

Par ailleurs, on remarque que l'effet de la semoule sur les rendements en couscous agit par effet d'interaction avec les conditions d'hydratation. Les rendements en couscous des échantillons roulés avec la semoule extra sont moins élevés que ceux des couscous fabriqués avec la semoule courante et ceci lorsque des taux d'hydratation élevés (38%) sont appliqués à des températures élevées (T22°C et T40°C). Cette diminution est due à l'augmentation excessive des grumeaux. Selon Dahoun-Lefkir (2005), les fractions grosses sont d'autant plus élevées quand une semoule fine et un taux d'hydratation élevé sont employés. En effet, la semoule extra est plus fine (D50= 318,33µm) et absorbe plus d'eau que la semoule courante (D50= 341,67µm) ce qui engendre la formation de gros grumeaux qui sont éliminés par le tamisage pendant l'opération du roulage, entraînant ainsi une diminution sensible des rendements en couscous. Nos résultats sont en accord avec ceux de Debbouz *et al.* (1994) qui ont observé que la semoule fine absorbe plus d'eau que les semoules moyenne et grosse pendant l'hydratation. Cependant, cette absorption excessive d'eau n'a pas été directement associée à un plus grand rendement de couscous. Selon ces auteurs, de grande quantité d'agglomérats humides surdimensionnés formés quand la semoule fine a été employée sont jetés et de ce fait diminuent les rendements en couscous. Par contre, l'utilisation de semoule intermédiaire et grosse entraîne la formation de granule de couscous et par conséquent des rendements élevés.

En revanche, lorsque l'eau froide (T0°C) est utilisée lors de l'hydratation de la semoule, les rendements en couscous des échantillons fabriqués avec la semoule extra sont supérieurs à ceux des couscous roulés avec la semoule courante. Donc, on peut supposer que l'utilisation de l'eau froide (T0°C) pour le roulage de la semoule fine permet d'améliorer les rendements en couscous et ce, en diminuant la formation de gros agglomérats au profit des grains de couscous.

Debbouz *et al.* (1994) ont montré, dans une étude sur l'influence de la matière première sur la qualité du couscous, que le rendement est étroitement associé à la qualité du gluten. Ces mêmes auteurs ont noté aussi que la teneur en protéines a un effet significatif sur l'absorption de l'eau par la semoule pendant l'opération de roulage et sur le rendement en couscous. En revanche, Bellocq *et al.* (2018) ont observé que la teneur en protéines des semoules n'est pas un facteur important qui a une incidence sur les mécanismes d'agglomération du couscous. Dans notre étude, nous avons relevé une corrélation significative positive entre la teneur en protéines et les rendements en grumeaux ($r=0,82$ à $p<0,05$) et une corrélation négative entre la teneur en protéine et les rendements en semoule non agglomérée ($r=-0,62$ à $p<0,05$) (Annexe

C). Par contre, aucune corrélation significative n'a été observée entre la teneur en protéine et les rendements en couscous.

Concernant la facilité du roulage, il ressort de nos observations expérimentales que les couscous fabriqués avec la semoule courante qui présente une granulométrie plus élevée que la semoule extra étaient plus faciles à rouler que ceux fabriqués avec la semoule extra. Ceci confirme les résultats de Dahoun-Lefkir (2005) qui a noté que plus la granulométrie de la semoule est élevée plus l'opération de roulage est facile. De même, Aluka *et al.* (1985) ont montré que le roulage est plus facile avec les grosses semoules.

2-2- Caractéristique du couscous à l'état sec

2-2-1- Granulométrie du couscous

La granulométrie fait partie des critères très importants dans l'évaluation de la qualité du couscous. La régularité et l'homogénéité des particules de couscous sont des paramètres désirables par le consommateur. Ces caractéristiques dépendent pour une large part des conditions opératoires retenues pour réaliser l'opération de roulage (Guezlane, 1993). La variation du taux d'hydratation ainsi que la durée du mélange permettent de fixer la granulométrie du couscous (Aluka, 1981).

2-2-1-1-Influence du taux d'hydratation sur la granulométrie du couscous

Les résultats de la granulométrie médiane (D50) et de la dispersion géométrique (Sg) des couscous étudiés en fonction du taux d'hydratation sont représentés dans la figure 15.

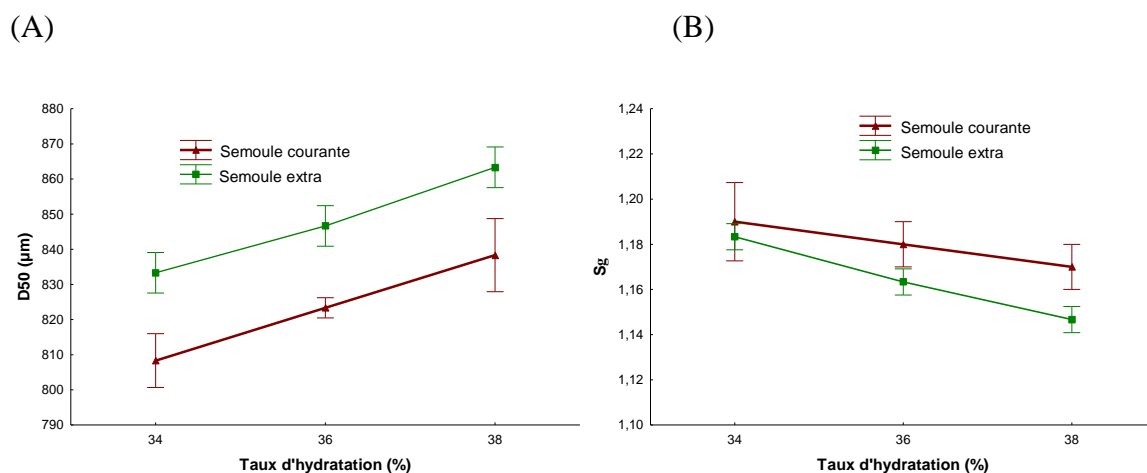


Figure 15 : Influence du taux d'hydratation sur la granulométrie des couscous : (A) D50 (B) Sg

L'analyse des résultats de la figure 15 (A) montre que la granulométrie médiane D50 est proportionnelle au taux d'hydratation. Nos résultats sont en accords avec ceux de Guezlane (1993). Aluka (1981), a observé que plus le degré d'hydratation est élevé, plus les grains obtenus après roulage sont gros. De même Saad *et al.* (2011) ; Barkouti *et al.* (2012) et Rondet *et al.* (2016) ont constaté une évolution du diamètre médian avec l'augmentation de la teneur en eau.

La dispersion géométrique (Sg) permet d'évaluer l'homogénéité des produits. Plus cet indice est élevé plus la dispersion est importante (Guezlane, 1993).

D'après les résultats (figure 15 (B)), on remarque que les valeurs de la dispersion géométrique (Sg) sont inversement proportionnelles au taux d'hydratation. Ces résultats confirment ceux trouvés par Rondet *et al.* (2016). Par contre, ils sont en contradiction avec ceux obtenus par Guezlane (1993) qui note que l'accroissement du taux d'hydratation et la durée de malaxage augmentent la dispersion granulométrique (Sg).

L'analyse de la variance (tableau 4) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur la D50 et le Sg.

2-2-1-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la granulométrie du couscous

Les résultats de la D50 et du Sg en fonction de la température de l'eau d'hydratation sont illustrés dans la figure 16.

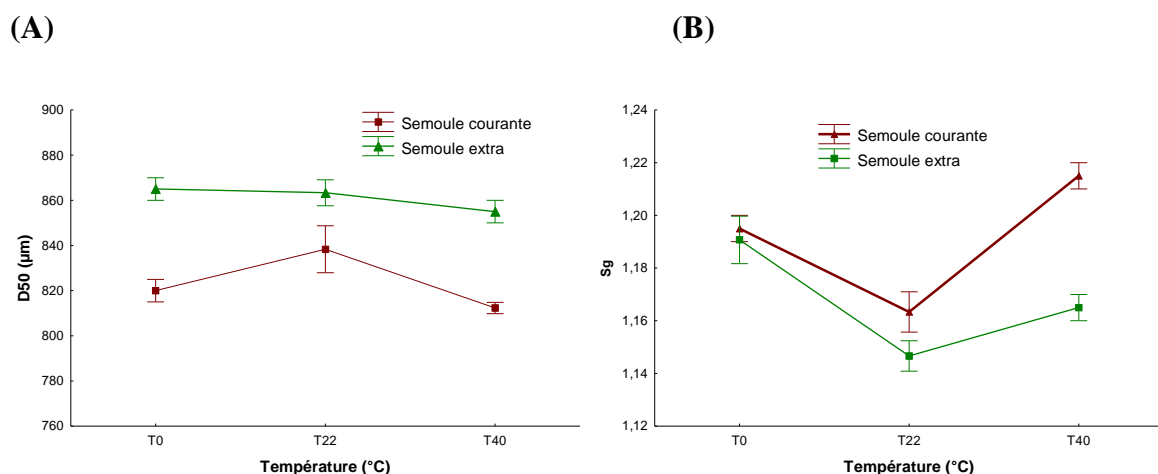


Figure 16 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la granulométrie des couscous : (A) D50 (B) Sg

Il de ressort de la figure 16 (A) que l'évolution de la D50 en fonction de la température de l'eau d'hydratation dépend de la semoule mise en œuvre. En effet, la D50 des couscous issus de la semoule courante sont plus élevés lorsque la semoule est hydratée avec de l'eau T22°C et elle diminue pour les couscous fabriqués avec de l'eau T0°C et T40°C. Alors que, pour les couscous roulés avec la semoule extra, la D50 des couscous diminue à mesure que la température de l'eau d'hydratation augmente. Concernant le Sg on note d'après la figure 16 (B), que les valeurs du Sg des couscous issus des 2 semoules étudiées (semoule extra et semoule courante) diminuent avec l'augmentation de la température de l'eau d'hydratation de T0°C à T22°C alors que, pour les couscous hydratés avec de l'eau à T40°C les valeurs du Sg augmentent. Ainsi, d'après ces résultats le roulage avec de l'eau à la température ambiante (T22°C) permet d'obtenir des couscous de granulométrie homogène.

L'analyse de la variance (tableau 4) met en évidence un effet hautement significatif ($p < 0,01$) de la température de l'eau d'hydratation sur la D50 et un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la température de l'eau d'hydratation sur le Sg.

2-2-1-3-Influence de la semoule sur la granulométrie du couscous

La comparaison des résultats de la granulométrie des couscous issus de la semoule courante et de la semoule extra (figures 15 et 16) montre que les couscous issus de la semoule courante présentent une granulométrie plus fine que ceux obtenus avec la semoule extra. Ceci est probablement en relation avec la granulométrie de la semoule. D'après nos résultats, la D50 du couscous est d'autant plus importante que la granulométrie de la semoule mise en œuvre est faible. Une corrélation significative et négative est notée ($r = -0,78$ à $p < 0,05$) entre la D50 du couscous et la D50 de la semoule utilisée (Annexe C). Ces résultats corroborent ceux obtenus par Tigroudja et Bendjoudiouadda (1999). Ces auteurs ont noté que la D50 des couscous issus des semoules fines sont plus élevées que la D50 des couscous issus des semoules grosses. Selon Djema (2000), les semoules fines forment des particules de couscous grosses à cause de leur difficulté au roulage. Ceci peut être expliqué par la différence dans les propriétés d'hydratation de la semoule en fonction de sa granulométrie. En effet, selon Hébrard *et al.* (2003) les semoules fines présentent une légère augmentation de la cinétique de sorption. Ces particules se caractérisent par des valeurs plus élevées des taux de sorption. Cette différence observée dans la cinétique de sorption des semoules selon la granulométrie peut être un paramètre important dans l'étape d'hydratation.

L'analyse de la variance (tableau 4) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur la D50 du couscous.

En ce qui concerne la dispersion géométrique des couscous on note d'après les figures 15 (B) et 16 (B) que les Sg des couscous issus de la semoule courante sont plus élevés que ceux obtenus avec la semoule extra. Ainsi, la semoule extra permet d'obtenir des couscous plus homogènes que ceux de la semoule courante. Le calcul des corrélations fait ressortir une corrélation positive ($r = 0,51$ à $p < 0,05$) entre la D50 de la semoule et la dispersion géométrique du couscous (Sg) (Annexe C).

L'analyse de la variance (tableau 4) fait ressortir un effet hautement significatif ($p < 0,01$) de la semoule sur le Sg du couscous.

2-2-2- Coloration des couscous

La coloration est un critère très important dans l'appréciation de la qualité du couscous à l'état sec. Les consommateurs apprécient des produits clairs, peu bruns et de coloration jaune (Icard et Feillet, 1997). La couleur se caractérise par deux composantes : l'indice de jaune et l'indice de brun. Plus l'indice de brun est faible, meilleure est la qualité (Bar, 2001). La couleur est liée d'une part à la teneur finale en pigments caroténoïdes et d'autre part aux réactions de brunissement enzymatique et non enzymatique (Icard et Feillet, 1997). D'après Debbouz *et al.* (1994), la coloration ne dépend pas seulement de la teneur en pigment de la semoule mais aussi de la présence des enzymes d'oxydation et des conditions de fabrication.

2-2-2-1-Influence du taux d'hydratation sur la coloration du couscous

Les résultats de la coloration en fonction du taux d'hydratation sont indiqués dans la figure 17. Ils font ressortir une augmentation de l'indice de brun avec l'accroissement du taux d'hydratation et une diminution l'indice de jaune. Ces résultats corroborent ceux trouvés par Guezlane (1993) ; Debbouz et Doetkott (1996) et Rondet *et al.* (2016). Les pigments caroténoïdes contenus dans la semoule sont responsables de la couleur jaune, mais des complexes enzymatiques, les lipoxygénases peuvent oxyder ces pigments et diminuer par conséquent l'indice de jaune (Abecassis *et al.*, 1990).

La couleur des pâtes est influencée par le procédé de fabrication. Au début du procédé, de fabrication le malaxage induit l'incorporation d'eau et d'oxygène dans la pâte, favorisant l'oxydation des acides gras polyinsaturés par la lipoxygénase, et par conséquent l'oxydation

des pigments caroténoïdes (Delcros *et al.*, 1998; Borrelli *et al.*, 2003). Lors de l'hydratation et du roulage du couscous, Guezlane *et al.* (1986) ont observé une très importante destruction des pigments caroténoïdes, soit environ 65% de la quantité initiale contenue dans les semoules. Au cours de ces étapes de fabrication, l'action des enzymes lipolytiques est responsable de la totalité de la dégradation des pigments caroténoïdes (Laignelet *et al.*, 1972).

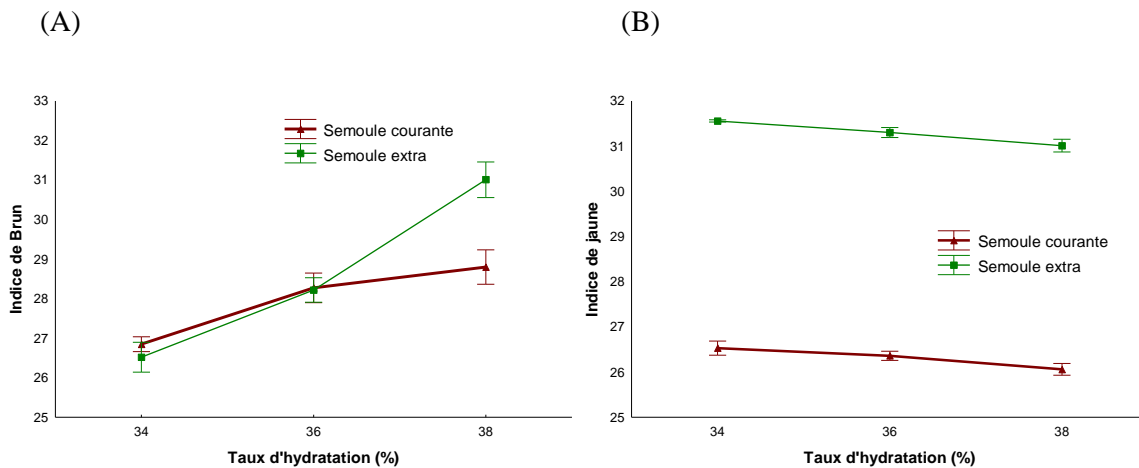


Figure 17 : Influence du taux d'hydratation sur la coloration des couscous :
(A) Indice de brun (B) Indice de jaune.

Selon Guezlane (1993), l'augmentation du taux d'hydratation favorise les réactions d'oxydation enzymatique impliquant les peroxydases et les polyphénols-oxydases de la semoule. Ces réactions ne peuvent être freinées, comme dans la fabrication des pâtes alimentaires, par l'utilisation du vide avant la mise en forme. La seule solution envisageable consisterait à réduire la durée de la phase d'agglomération des particules du couscous.

L'analyse de la variance (tableau 4) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur l'indice de jaune et l'indice de brun.

2-2-2-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la coloration du couscous

Les résultats de la coloration en fonction de la température sont illustrés dans la figure 18.

L'analyse de la figure 18 montre que l'indice de jaune diminue en fonction de la température. En effet, les valeurs maximales de l'indice de jaune sont enregistrées pour les couscous roulés avec l'eau T0°C et elles diminuent avec l'accroissement de la température. La diminution de l'indice de jaune provient de la destruction des pigments caroténoïdes par la

lipoxygénase. Selon Borrelli *et al.* (1999) l'activité de la lipoxygénase est le principal facteur impliqué dans la perte de la couleur jaune des pâtes. Delcros *et al.* (1998) ont noté que l'activité de la lipoxygénase est plus élevée lorsque la température du mélange augmente de 18°C à 32°C.

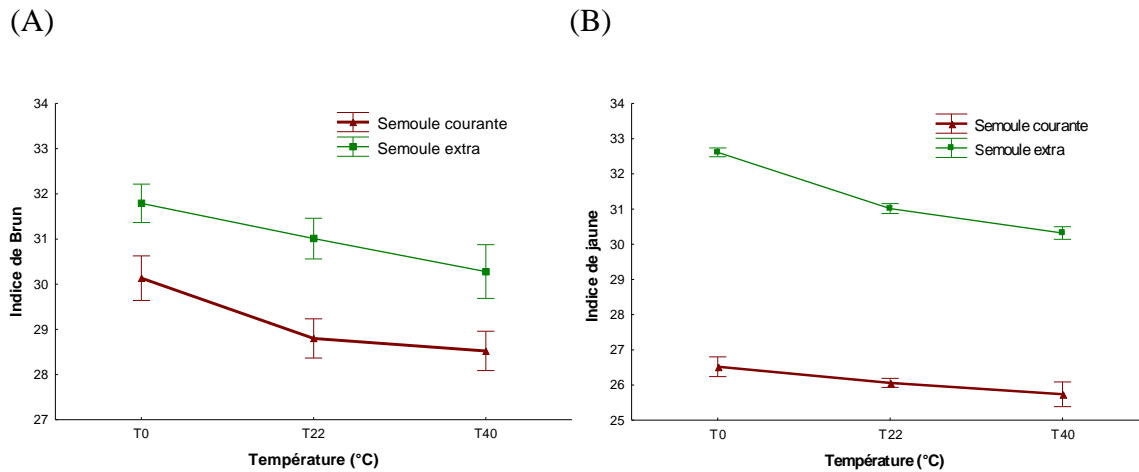


Figure 18 : Influence de la température sur la coloration :
(A) Indice de brun (B) Indice de jaune

D'après les résultats (figure 18 (A)) lorsque la température de l'eau de l'hydratation augmente de T0 à T40°C, les valeurs de l'indice de brun diminuent.

L'analyse de la variance (tableau 4) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la température de l'eau d'hydratation sur les indices de jaune et de brun.

2-2-2-3-Influence de la semoule sur la coloration du couscous

Il ressort des résultats des figures 17 et 18 que la semoule mise en œuvre exerce une très grande influence sur la couleur du couscous sec. En passant des couscous issus de la semoule extra à ceux issus de la semoule courante, les indices de jaune des couscous diminuent considérablement. Cette différence peut être expliquée par la richesse de la semoule extra (IJ=32,77) en pigments caroténoïdes par rapport à la semoule courante (IJ=28,49). Une corrélation significative positive est notée entre l'indice de jaune des couscous et l'indice de jaune des semoules ($r=0,96$ à $p < 0,05$) (Annexe C). Ces résultats corroborent ceux trouvés par Guezlane (1993) qui a montré que la couleur des couscous sec dépend de la semoule mise en œuvre. Selon Bar (2001), la couleur d'une pâte résulte essentiellement de deux caractéristiques du blé dur mis en œuvre : son potentiel en pigments caroténoïdes et son

activité enzymatique, qui peut provoquer au cours, de la pastification, une altération de l'indice de jaune et une augmentation de l'indice de brun.

L'analyse de la variance (tableau 4) montre un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur l'indice de jaune des couscous.

L'indice de brun est plus faible pour les couscous issus de la semoule courante et plus élevé chez les couscous roulés avec la semoule extra. Ceci revient à la différence de la granulométrie des semoules. En effet, la semoule extra est plus fine avec une $D50 = 318,33 \mu\text{m}$ par rapport à celle de la semoule courante $D50 = 341,67 \mu\text{m}$. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Tigroudja et Bendjoudiouadda (1999) et Djema (2000). Ces auteurs ont constaté que les indices de brun deviennent plus élevés avec la diminution de la granulométrie de la semoule. Matveef (1969) a constaté que les débris d'enveloppes dans la semoule fine conduisent au brunissement des pâtes. Ce brunissement est dû non seulement au son apporté par les grains, mais également aux protéines génératrices de couleur brune par réaction chimique et enzymatique. Il a noté aussi une corrélation positive entre la taille des particules de la semoule industrielle et l'indice de brun.

L'analyse de la variance (tableau 4) fait ressortir un effet non significatif de la semoule sur l'indice de brun.

Tableau 4 : Analyse de la variance des caractéristiques des couscous à l'état sec

	Indice de brun	Indice de jaune	D50	Sg
Moyenne	28,95	28,8	836,57	1,18
Maximum	31,87	32,73	870	1,22
Minimum	26,09	25,5	800	1,14
Ecart type	1,61	2,67	20,47	0,02
Coefficient de variation	5,57	9,28	2,45	1,73
Effet de la Température	***	***	**	***
Effet du taux d'hydratation	***	***	***	***
Effet de la semoule	NS	***	***	**

*: Significatif à $p < 0,05$

** : Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : Très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

2-3- Caractéristiques de la qualité culinaire

2-3-1- Gonflement du couscous

Le phénomène de gonflement résulte de l'absorption de différentes quantités d'eau par les éléments constitutifs des grains de couscous (Mezroua, 2011). Il est mesuré par les changements du volume apparent d'un échantillon de couscous une fois immergé dans l'eau à 25°C ou une eau à 100°C. Les valeurs élevées du gonflement de couscous sont indicatives d'un produit de haute qualité (Guezlane et Abecassis, 1991; Guezlane, 1993; Ounane *et al.*, 2006). Les valeurs de gonflement du couscous peuvent être liées à la capacité d'hydratation de la semoule. La capacité de gonflement à l'eau du couscous est un test souvent pratiqué dans les usines pour contrôler la qualité des produits finis et dont il est parfois tenu compte dans les transactions commerciales (Guezlane, 1993).

2-3-1-1-Influence du taux d'hydratation sur le gonflement à froid et à chaud des couscous

Les résultats de la capacité de gonflement à froid et à chaud en fonction du taux d'hydratation sont représentés dans la figure 19.

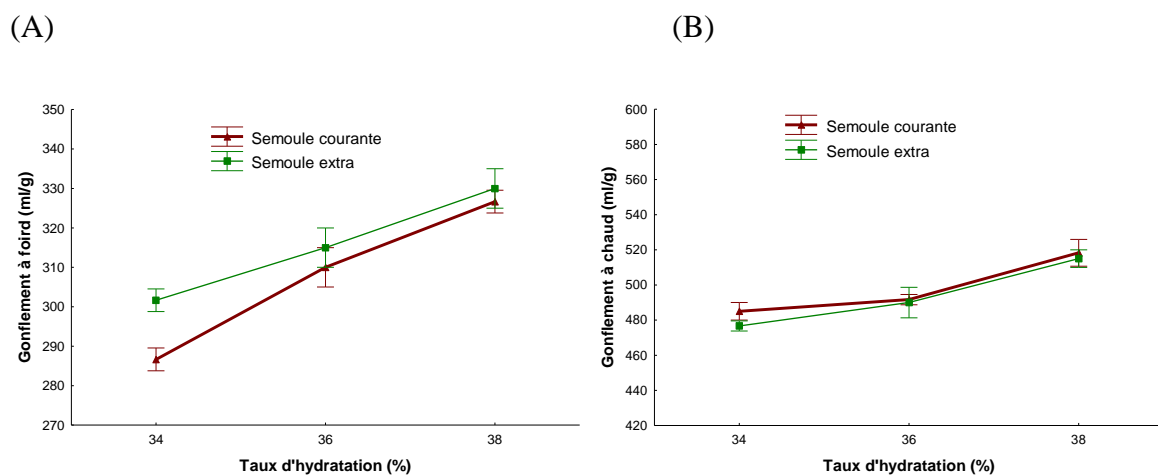


Figure 19 : Influence du taux d'hydratation sur la capacité d'hydratation des couscous :
(A) Gonflement à froid (B) Gonflement à chaud

Les résultats illustrés par la figure 19 montrent que les indices de gonflement à froid et à chaud augmentent en fonction du taux d'hydratation. Ces résultats concordent ceux trouvés par Aluka *et al.* (1985). Ces auteurs ont observé dans une étude portant sur les conditions de fabrication du couscous de maïs, que l'indice de gonflement du couscous augmente nettement avec le taux d'hydratation des semoules. Ces résultats pourraient s'expliquer par le degré de

cohésion des granules de couscous formés pendant le roulage. Selon Guezlane (1993), si les agglomérats ne sont pas suffisamment cohérents ils vont avoir tendance à se déliter lorsqu'ils seront mis au contact de l'eau. Au contraire, la formation d'agglomérats trop dense va donner des produits s'hydratant mal, plus lentement. La capacité de gonflement des agglomérats dépend de leur capacité à gonfler et à piéger l'eau à l'intérieur des vides internes (Hafsa *et al.*, 2015).

D'autre part, la capacité de gonflement des agglomérats dépend aussi de l'état cristallin des granules de l'amidon (Hafsa *et al.*, 2015). Durant l'hydratation et le roulage du couscous les granules de l'amidon s'hydratent et au cours de la précuisson ces granules de l'amidon hydratées se gélatinisent. Pendant ces étapes de fabrication de couscous l'amidon subit des transformations importantes qui modifient sa capacité de gonflement. En effet, Hafsa *et al.* (2015) ont observé que la capacité de gonflement des agglomérats cuits à la vapeur est plus élevée que celle des agglomérats qui ne sont pas cuits à la vapeur, en raison des mécanismes de gélatinisation des granules d'amidon, la perte de la structure cristalline, et la formation de structure hygroscopique amorphe. L'augmentation du taux d'hydratation pendant le roulage du couscous induit une hydratation plus importante des granules de l'amidon et par conséquent une gélatinisation de ces granules d'amidon plus importante pendant la précuisson du couscous ce qui se traduit par une augmentation du gonflement du couscous.

L'analyse de la variance (tableau 5) fait ressortir un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur le gonflement à froid et à chaud des couscous.

2-3-1-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur le gonflement à froid et à chaud des couscous

Les résultats de la capacité de gonflement à froid et à chaud en fonction de la température de l'eau d'hydratation sont regroupés dans la figure 20.

L'analyse de figure 20 (A) et (B) montre que les couscous fabriqués avec l'eau T0°C enregistrent les meilleurs gonflements à froid et à chaud que ceux fabriqués avec de l'eau T22°C et que ces derniers gonflent mieux que ceux fabriqués avec l'eau T40°C. Donc, plus la température de l'eau d'hydratation est faible meilleur est le gonflement.

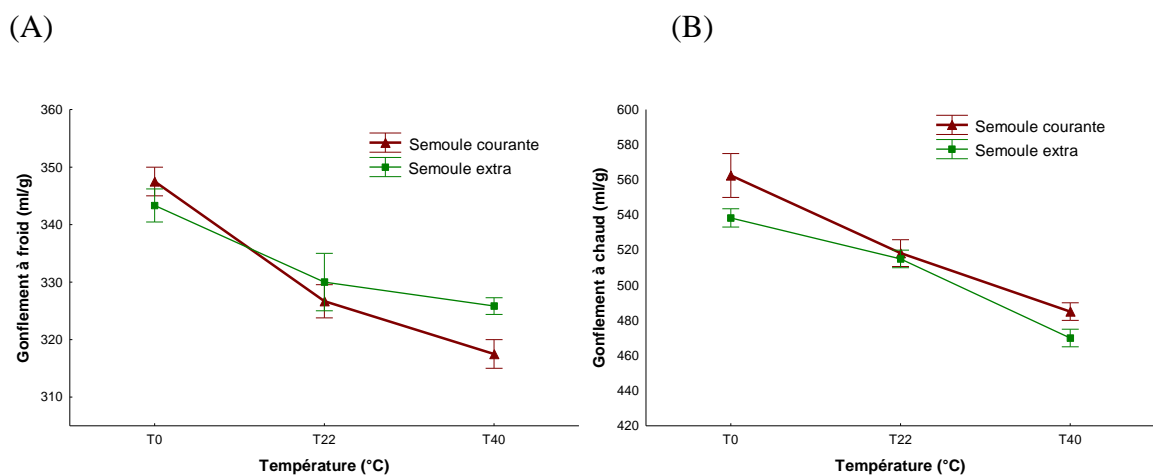


Figure 20 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la capacité d'hydratation des couscous : (A) Gonflement à froid (B) Gonflement à chaud

L'analyse de la variance (tableau 5) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la température de l'eau d'hydratation sur le gonflement à froid et à chaud des couscous.

2-3-1-3- Influence de la semoule sur le gonflement à froid et à chaud des couscous

La comparaison des résultats de la capacité d'hydratation des couscous obtenus des deux semoules étudiées regroupés dans les figures 19 (A) et (B) et 20 (A) et (B) montre que les gonflements à froid et à chaud des couscous issus de la semoule courante sont comparables à ceux des couscous fabriqués avec la semoule extra.

L'analyse de la variance (tableau 5) montre un effet non significatif de la semoule sur le gonflement à froid et à chaud des couscous.

2-3-2- Prise en masse du couscous cuit

La prise en masse du couscous cuit est un critère important dans la détermination de sa qualité culinaire. Elle est déterminé par l'indice de prise en masse du couscous par tamisage (IPMT) qui correspond au pourcentage en masse de couscous formant de gros agglomérats (>3 mm) pendant la réhydratation et la cuisson (Yettou *et al.*, 1997). Les valeurs expérimentales de cet indice sont liées au degré d'agglomération du couscous cuit. Les faibles valeurs de IPMT peuvent être indicatrices d'un produit de haute qualité (Ounane *et al.*, 2006).

2-3-2-1-Influence du taux d'hydratation sur la prise en masse du couscous cuit

Les résultats obtenus pour l'indice de prise en masse des échantillons étudiés en fonction du taux d'hydratation sont présentés dans la figure 21.

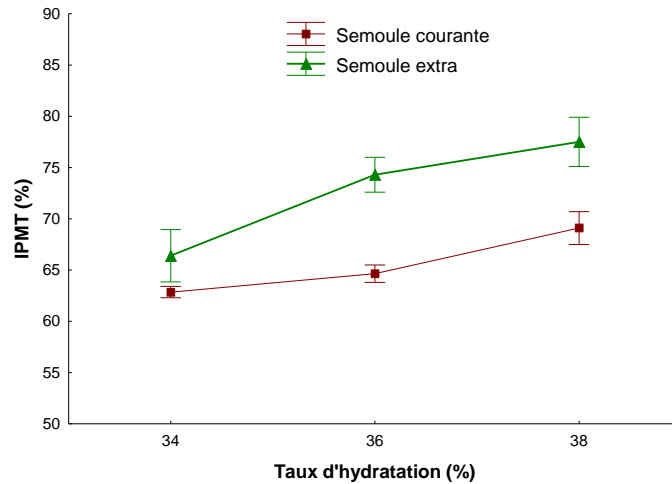


Figure 21 : Influence du taux d'hydratation sur l'indice de prise en masse des couscous

L'analyse des résultats présentés dans la figure 21 fait ressortir que l'indice de prise en masse augmente avec l'accroissement du taux d'hydratation. L'analyse de variance met en évidence un effet très hautement significatif du taux d'hydratation sur l'IPMT. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Guezlane (1993) qui a révélé un effet défavorable de l'augmentation du taux d'hydratation des semoules et de la durée de malaxage sur cet indice. Il a aussi noté que la formation de couscous trop compact a pour conséquence la production de produit collant.

L'aspect collant du couscous est fortement corrélé à la quantité des composants solubles de l'amidon et leur degré de ramification (Aboubacar et Hamaker, 1999, 2000). Ces composants doivent être le produit d'une dégradation enzymatique de l'amylopectine native lors de la fabrication du couscous (Aboubacar et Hamaker, 2000). Les pertes à la cuisson pourraient avoir un effet déterminant sur le collant du couscous spécialement avec la méthode rapide de cuisson, où le couscous est mis directement au contact de l'eau bouillie comparée à la méthode traditionnelle où le couscous est cuit à la vapeur d'eau. En effet sous l'effet de la chaleur, les grains d'amidon vont gonfler, perdre leur structure semi-cristalline et libérer en partie leur contenu surtout l'amylose dans la masse du grain de couscous jusqu'à la surface qui entraîne une augmentation du collant. Ce phénomène serait peut être plus accentué par la

méthode de cuisson rapide du couscous (Debbouz et Donnelly, 1996). Cependant, dans cette étude corrélation significative entre l'indice de solubilité et l'IPMT n'a été enregistrée.

L'analyse de variance des résultats (tableau 5) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur l'IPMT.

2-3-2-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la prise en masse du couscous cuit

Les résultats des valeurs de l'indice de prise en masse (IPMT) des couscous en fonction de la température de l'eau d'hydratation sont donnés dans la figure 22. Ils font ressortir que l'IPMT des échantillons hydratés est proportionnel à la température de l'eau d'hydratation. Donc, l'augmentation de la température de l'eau d'hydratation favorise le collant du couscous.

L'analyse de la variance (tableau 5) fait apparaître un effet hautement significatif ($p < 0,01$) de la température sur l'indice de prise en masse.

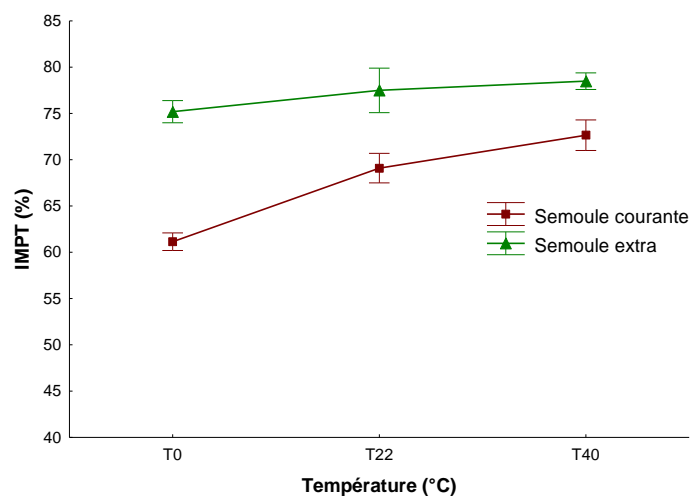


Figure 22 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur l'indice de prise en masse des couscous

L'augmentation du collant avec l'accroissement de la température de l'eau d'hydratation de T0°C à T40°C s'explique par l'augmentation des pertes à la cuisson. Il est probable que l'augmentation de la température, conduit à l'endommagement du grain d'amidon et donc à la libération de l'amylose à la surface qui provoque une augmentation du collant. En revanche, le roulage avec de l'eau à T0°C permet d'améliorer le collant du couscous. Cette diminution du collant du couscous suggère une réduction de la solubilisation de l'amylose. D'après Cuq

et al. (2013), un refroidissement des molécules d'amylose et d'amylopectine conduit à la formation de structures cristallines. L'organisation dans les structures cristallines se caractérise par un faible volume de petites molécules libres disponibles pour les interactions avec une faible mobilité moléculaire.

2-3-2-3-Influence de la semoule sur la prise en masse du couscous cuit

L'analyse des résultats de l'IPMT en fonction de la semoule utilisée (figures 21 et 22) montre que les couscous issus de la semoule courante présentent un collant plus faible que ceux fabriqués avec la semoule extra. Ceci est due vraisemblablement à par la teneur en lipides plus élevée de la semoule courante (1,075% ms) par rapport à celle de la semoule extra (0,746% ms). La matrice de corrélation fait apparaître une corrélation négative et significative entre la teneur en lipides des semoules et l'IPMT ($r=-0,72$ à $p<0,05$) (Annexe C). Selon Guezlane *et al.* (1998), la diffusion de l'amylose se produit au cours du traitement hydrothermique et provoque en l'absence de lipides complexables une légère remontée du collant. Le phénomène de la complexation de l'amylose par les lipides constitue le mécanisme de base conduisant à la diminution de la prise en masse du couscous lors de sa réhydratation. Belaid *et al.* (1994) ont remarqué une diminution de la prise en masse en fonction de l'ajout des monoglycérides. De même, Ounane *et al.* (2006) ont noté l'impact positif des lipides sur la diminution du collant. Pour, Aboubacar et Hamaker (2000) les lipides améliorent la texture du couscous de sorgho.

L'analyse de la variance (tableau 5) met en évidence un effet très hautement significatif ($p<0,001$) de la semoule sur l'IPMT.

2-3-3- Délitescence du couscous

La délitescence constitue un paramètre de la qualité culinaire du couscous de blé dur et représente, au même degré que le collant, un critère fondamental de la qualité organoleptique du couscous cuit (Yettou *et al.*, 2000).

2-3-3-1-Influence du taux d'hydratation sur la délitescence du couscous

Les résultats de la délitescence du couscous en fonction du taux d'hydratation sont présentés dans la figure 23. L'analyse de ces résultats fait ressortir que les valeurs de la délitescence diminuent avec l'accroissement du taux d'hydratation. Cette augmentation peut être expliquée par la force de cohésion entre les particules de la semoule qui augmente avec

l'accroissement du taux d'hydratation. Hébrard *et al.* (2003) ont souligné que par l'hydratation, des liaisons se forment entre les particules de semoule permettant leur agglomération. Donc, on peut conclure que l'augmentation du taux d'hydratation permet de renforcer les liaisons entre les particules de la semoule pendant le roulage conduisant ainsi à la formation de grains de couscous fermes et qui ont moins tendance à se déliter.

Yettou (1998) a noté une relation entre la délitescence et la granulométrie du couscous. Cet auteur a souligné que la diminution de la délitescence en fonction de la taille des grains de couscous se traduit par une augmentation de la force de cohésion des particules de semoule avec l'augmentation du diamètre des granules de couscous. En effet, dans notre étude une corrélation significative et négative ($r=-0,85$ à $p<0,05$) a été observée entre la délitescence et la D50 du couscous (Annexe C).

L'analyse de la variance (tableau 5) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p<0,001$) du taux d'hydratation sur la délitescence.

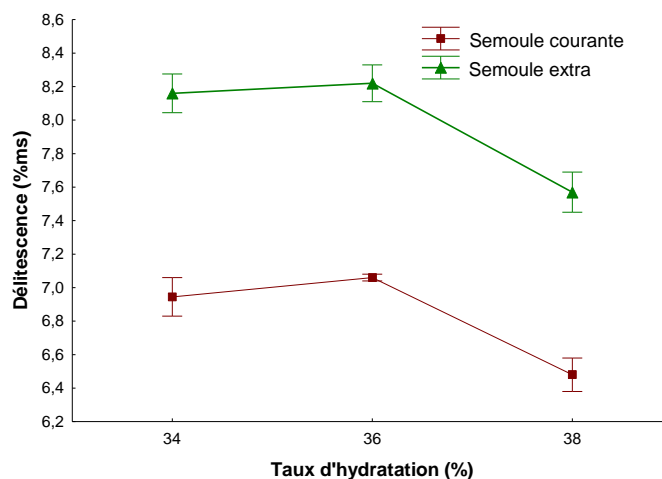


Figure 23 : Influence du taux d'hydratation sur la délitescence

2-3-3-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la délitescence du couscous

Les résultats de la délitescence du couscous en fonction de la température de l'eau d'hydratation sont illustrés dans la figure 24. L'analyse détaillée de ces résultats montre que la délitescence des couscous est proportionnelle à la température de l'eau d'hydratation. De ce fait, le roulage du couscous avec l'eau froide permet d'obtenir des produits moins délitescents.

L'analyse de la variance (tableau 5) montre un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la température de l'eau d'hydratation sur la délitescence du couscous.

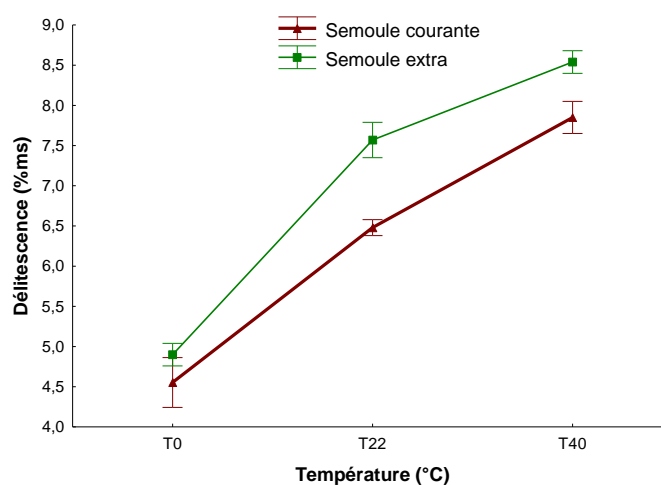


Figure 24 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur la délitescence

2-3-3-3-Influence de la semoule sur la délitescence du couscous

L'analyse des résultats de la délitescence en fonction de la semoule utilisée (figures 23 et 24) fait apparaître que les produits obtenus avec la semoule extra sont plus délitescents que ceux fabriqués avec la semoule courante. Cette différence pourrait être liée aux caractéristiques de la semoule. Une corrélation significative et négative ($r = -0,87$ à $p < 0,05$) est observée entre la D50 de la semoule et la délitescence du couscous (Annexe C). Il ressort de cette corrélation que les couscous issus d'une semoule fine présente une délitescence plus élevée.

Une corrélation significative et négative est noté ($r = -0,9$ à $p < 0,05$) entre la teneur en lipides de la semoule et la délitescence du couscous (Annexe C). Ces résultats corroborent ceux trouvés par Ounane *et al.* (2006) qui ont obtenus une corrélation négative entre la délitescence du couscous et la teneur en lipides libres de la semoule ($r = -0,49$ à $p < 0,05$), la teneur en phospholipides de la semoule ($r = -0,54$ à $p < 0,05$) ou la teneur en lipides libres apolaires de la semoule ($r = -0,48$ à $p < 0,05$). Ces auteurs, ont révélé que les lipides apolaires sur la surface des particules pourraient se complexer avec l'amylose pendant la cuisson, réduisant ainsi sa diffusion et la désintégration des particules de couscous. Selon Guezlane *et al.* (1998), la diffusion d'amylose sur la surface des particules de couscous pendant la cuisson est responsable de la désintégration des particules. Cette désintégration peut être limitée par

l'action des acides gras et des monoglycérides. Ces mêmes auteurs ont aussi noté que la teneur élevée en lipides libres de la semoule pourrait entraîner une diminution de la perte d'amidon lors de la cuisson du couscous.

Par ailleurs, on observe d'après la figure 24 que lorsque la semoule extra est hydratée avec une eau froide (0°C), elle montre une délitescence similaire à celle de la semoule courante. Ainsi, l'utilisation de l'eau froide permet d'améliorer l'intégrité des particules de couscous.

L'analyse de la variance (tableau 5) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la semoule sur la délitescence.

2-3-4- Indice de solubilité

L'indice de solubilité dans l'eau est mesuré comme la quantité des solides solubilisés pendant l'immersion d'un échantillon de couscous dans un excès d'eau (Debbouz *et al.*, 1994; Ounane *et al.*, 2006). Les valeurs basses de l'indice de solubilité dans l'eau sont indicatrices des produits de haute qualité (Ounane *et al.*, 2006).

2-3-4-1-Influence du taux d'hydratation sur l'indice de solubilité

Les résultats de l'indice de solubilité en fonction du taux d'hydratation sont présentés dans la figure 25. Ils montrent une augmentation de l'indice de solubilité du couscous avec l'accroissement du taux d'hydratation. Pendant l'agglomération et l'hydratation de la semoule, les granules d'amidon s'hydratent et pendant la cuisson à la vapeur, elles se gélifient. Le processus d'agglomération augmente significativement l'indice de solubilité dans l'eau par rapport à la semoule. Le procédé de cuisson à la vapeur donne aux agglomérats des valeurs de solubilité nettement plus élevées. Les mécanismes de gélification favorisent la lixiviation partielle des granules d'amidon des chaînes d'amylose, qui sont capables de se solubiliser dans l'eau. Par conséquent, avec l'augmentation du taux d'hydratation, il y a plus d'amidon gélifié qui augmente l'indice de solubilité (Hafsa *et al.*, 2015).

L'analyse de la variance (tableau 5) fait ressortir un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur l'indice de solubilité.

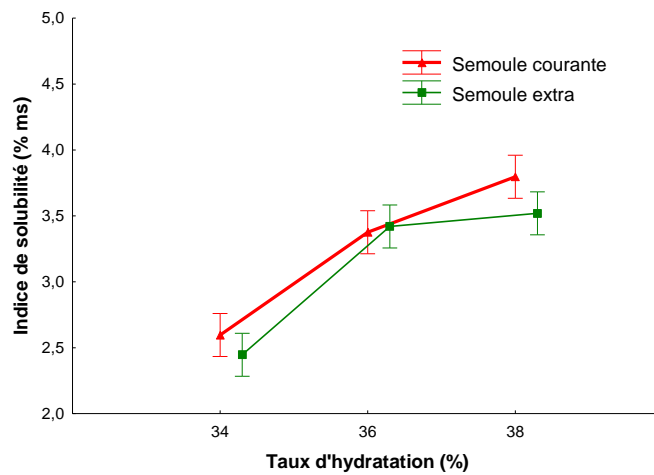


Figure 25 : Influence du taux d'hydratation sur l'indice de solubilité

2-3-4-2-Influence de la température de l'eau d'hydratation sur l'indice de solubilité

L'analyse des résultats de l'indice de solubilité en fonction de la température (figure 26) fait apparaître un indice de solubilité d'autant plus grand que la température de l'eau d'hydratation est élevée. Ces résultats confirment ceux trouvés par Abecassis *et al.* (1994) qui ont rapporté que l'accroissement de la température augmente les pertes à la cuisson. De plus, la diminution de la température conduit à une faible libération de l'amylose. Il est probable que l'eau froide influence la structure des grains d'amidon. En effet, Cuq *et al.* (2013) ont noté que les basses températures agissent sur les molécules d'amylose et d'amylopectine et conduisent à la formation de structure cristalline qui se caractérise par une faible libération des petites molécules et une faible mobilité moléculaire.

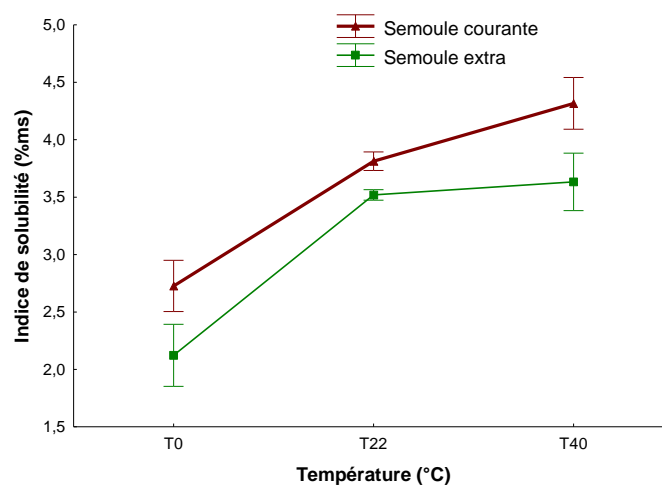


Figure 26 : Influence de la température de l'eau d'hydratation sur l'indice de solubilité

L'analyse de variance des résultats (tableau 5) met en évidence un effet hautement significatif ($p < 0,01$) de la température sur l'indice de solubilité.

2-3-4-3-Influence de la semoule sur l'indice de solubilité

D'après les résultats des indices de solubilité des couscous illustrés dans les figures 25 et 26 il apparaît que les valeurs des indices de solubilité issus de la semoule courante sont légèrement plus élevées que ceux des couscous issus de la semoule extra.

L'analyse de la variance (tableau 5) fait apparaître un effet non significatif de la semoule sur l'indice de solubilité.

Tableau 5 : Analyse de la variance de la qualité culinaire des couscous.

	Gonflement à froid	Gonflement à chaud	IPMT	Délitescence	Indice de solubilité
Moyenne	320,42	503,25	71,13	7,06	3,15
Maximum	350	575	79,9	8,68	4,54
Minimum	285	465	62,3	4,68	1,82
Ecart type	18,02	29,1	5,58	1,27	0,72
Coefficient de variation	5,62	5,78	7,84	17,93	22,73
Effet de la température	***	***	**	***	**
Effet du taux d'hydratation	***	***	***	***	***
Effet de la semoule	NS	NS	***	***	NS

* : Significatif à $p < 0,05$

** : Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : Très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

Conclusion du chapitre II

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont montré que les facteurs étudiés (taux d'hydratation et température de l'eau d'hydratation) ont un effet sur les rendements du roulage du couscous, sur la qualité des couscous à l'état secs ainsi que sur la qualité culinaire des couscous.

L'augmentation du taux d'hydratation induit des rendements en couscous et en grumeaux plus élevés. Par contre, les rendements en semoules non agglomérées sont d'autant plus faibles que le taux d'hydratation est élevé. L'utilisation de l'eau à température $T0^{\circ}\text{C}$ est favorable à la granulation du couscous puisqu'elle engendre moins de grumeaux. Par contre, l'eau à température $T22^{\circ}\text{C}$ et l'eau à $T40^{\circ}\text{C}$ conduisent à la formation de grandes quantités de

grumeaux minimisant les rendements en couscous. Les rendements en semoules non agglomérées sont comparables pour tous les couscous hydratés à différentes températures (0°C, 22°C et 40°C).

Les caractéristiques physico-chimiques du couscous à l'état sec se trouvent influencer par les conditions d'hydratation. En effet, la granulométrie médiane du couscous est d'autant plus élevée que le taux d'hydratation augmente. Alors que, la dispersion géométrique diminue. En revanche, l'évolution de la granulométrie médiane en fonction de la température de l'eau d'hydratation dépend de la semoule mise en œuvre. De plus, le roulage avec de l'eau à la température ambiante permet d'obtenir des couscous de granulométrie plus homogène. En ce qui concerne la coloration, l'accroissement du taux d'hydratation entraîne une augmentation de l'indice de brun et une diminution de l'indice de jaune. Lorsque la température de l'eau d'hydratation augmente de T0 à T40°C, l'indice de brun ainsi que l'indice de jaune sont de plus en plus faibles.

Les conditions d'hydratation jouent un rôle déterminant dans la qualité culinaire du couscous. Avec l'augmentation du taux d'hydratation la capacité d'hydratation des couscous s'améliore et la délitescence diminue. En revanche, l'augmentation du taux d'hydratation a eu un effet néfaste sur le collant des produits. L'accroissement du taux d'hydratation a augmenté l'indice de solubilité. Par ailleurs, les couscous fabriqués avec l'eau à la température T0°C enregistrent les meilleurs gonflements à froid et à chaud. De plus, la diminution de la température de l'eau d'hydratation a diminué le collant, la délitescence et l'indice de solubilité.

CHAPITRE III : Optimisation des conditions d'hydratation

Dans le cas où l'on souhaite étudier l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux sur une réponse, la méthodologie des plans d'expériences est la plus adaptée. En effet, les plans d'expériences permettent une hiérarchisation de l'influence des paramètres, de mettre en évidence les interactions éventuelles entre les paramètres tout en réduisant le nombre d'expériences à réaliser. Ces plans sont également adéquats lorsque qu'une optimisation multi-réponses d'un système est recherchée.

L'objectif de cette partie d'étude est de rechercher les conditions optimales d'hydratation du couscous.

3-1- Plan d'expérience

Dans cette étude on a opté pour le plan expérimental complet exploitant une matrice factorielle à 2^k expériences (k représente le nombre de facteurs étudiés et le 2 représente les niveaux de facteur). Pour cela, une première évaluation permettra de cerner les principaux facteurs qui affectent les paramètres de la qualité du couscous, suivie d'une estimation de l'importance et de la signification de l'effet de chacun des facteurs influant la qualité du couscous. En se basant sur les résultats obtenus au Chapitre II, notre étude a porté sur trois facteurs dont l'influence sur la qualité du couscous est fondamentale, à savoir : le taux d'hydratation, la température de l'eau d'hydratation et la semoule mise en œuvre.

Le domaine expérimental défini pour les trois facteurs retenus pour cette étude (tableau 6), permet d'établir la matrice d'expérience factorielle complète de 3 facteurs à 2 niveaux chacun, notée 2^3 , formée des 8 combinaisons décrites dans le tableau 7.

Tableau 6 : Domaine expérimental

Facteurs quantitatifs		
Facteurs	Niveau inférieur (-1)	Niveau supérieur (+1)
Taux d'hydratation (%) (X_1)	36	38
Température de l'eau d'hydratation (°C) (X_2)	0	22
Facteur qualitatif		
Facteur	Choix 1 (-1)	Choix 2 (+1)
Semoule mise en œuvre (X_3)	Semoule courante (SC)	Semoule extra (SE)

Tableau 7 : Matrice d'expériences factorielle 2³

Essais	X ₁	X ₂	X ₃
E1	-	-	-
E2	+	-	-
E3	+	+	+
E4	-	-	+
E5	-	+	+
E6	+	+	-
E7	-	+	-
E8	+	-	+

Le tableau 8 regroupe les résultats pour le rendement (Y1), la délitescence (Y2), l'IPMT (Y3), l'indice de solubilité (Y4), l'indice de Brun (Y5), l'indice de Jaune (Y6), le gonflement à froid (Y7), le gonflement à chaud (Y8), la D50 (Y9) et le Sg (Y10) pour chacun des points examinés du plan.

3-2-Analyse du plan d'expérimentation

3-2-1-Modélisation

Pour l'étude des trois facteurs, le modèle mathématique qui prend en considération les effets principaux et leurs interactions est adopté.

Les différentes réponses sont liées aux différents facteurs par le modèle suivant :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3$$

Ce modèle comporte un coefficients moyen a_0 , trois coefficients principaux (a_1, a_2, a_3) correspondants aux effets principaux des trois facteurs et trois coefficients (a_{12}, a_{13}, a_{23}) correspondants aux effets des interactions des facteurs sur la réponse Y.

L'effet moyen et les effets principaux et d'interaction sont calculés à partir du logiciel SATGRAPHICS Centurion XVII.

3-2-2- Validité du modèle mathématique

La validité du modèle est estimée par l'analyse de la variance, l'étude des résidus ainsi que la comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales.

Tableau 8 : Caractéristiques de la qualité du couscous pour les points du plan d'expérience.

Essai	Taux Hydratation (%)	Température de l'eau d'hydratation (°C)	Semoule	Rendement (%) (Y1)	DD (%) (Y2)	IPMT (%) (Y3)	IS (%ms) (Y4)	IB (Y5)	IJ (Y6)	G25 (Y7)	G100 (Y8)	D50 (µm) (Y9)	Sg (Y10)
1	36	0	SC	39,5	5,61	55,65	1,81	28,68	26,39	336,67	527,5	800	1,2125
2	38	0	SC	48,35	4,55	61,15	2,73	29,8	26,52	347,5	562,5	820	1,1951
3	38	22	SE	40,52	7,57	77,5	3,52	30,28	31,01	330	515	863,33	1,1467
4	36	0	SE	46	6,85	69,6	1,37	30,95	30,33	322,5	507,5	850	1,22
5	36	22	SE	36,47	8,22	74,3	3,42	28,22	31,3	315	490	846,67	1,1633
6	38	22	SC	45,15	6,48	69,1	3,8	29,39	26,06	326,67	518,33	838,33	1,17
7	36	22	SC	36,43	7,06	64,65	3,38	28,27	26,36	310	491,67	823,33	1,18
8	38	0	SE	50,65	4,9	75,2	2,12	31,79	30,45	343,33	538,33	865	1,1907

L'ensemble des caractéristiques essentielles d'ajustement du modèle adopté est consigné dans le tableau 9. Le résultat du R^2 , qui est le pourcentage de la variabilité de la réponse obtenu expliqué par le modèle, montre que le modèle à un fort ajustement pour toutes les réponses. Le tableau (9) renseigne également la valeur de l'écart type résiduel et la valeur de la moyenne des résidus des réponses obtenues.

Tableau 9 : Résumé des caractéristiques de l'ajustement du modèle mathématique

Variable dépendante	R^2 (%)	Ecart type des résidus	Valeur moyenne des résidus
Rendement	99,987	0,166	0,059
Délitescence	99,277	0,29	0,103
IMPT	99,942	0,477	0,169
Indice de solubilité	99,951	0,053	0,019
Indice de brun	98,402	0,431	0,153
Indice de jaune	99,999	0,007	0,003
Gonflement à froid	98,596	4,123	1,458
Gonflement à chaud	99,981	0,885	0,313
D50	99,845	2,355	0,833
Sg	99,918	0,002	0,001

L'analyse de la variance et les coefficients de régression des réponses sont mentionnés dans le tableau 10. L'analyse de ce tableau fait ressortir que 5 facteurs sont significatifs sur l'indice de jaune, 4 facteurs sont significatifs sur le rendement et le gonflement à chaud, 3 facteurs sont significatifs sur l'IPMT, 2 facteurs sont significatifs sur l'indice de solubilité et le Sg et 1 seul facteur est significatif sur la D50. Alors que, pour l'indice de brun, le gonflement à froid et la délitescence aucun facteur n'est significatif. Les effets des principaux facteurs ainsi que leurs interactions sont représentés dans le diagramme de Pareto pour chaque réponse (Annexe A), qui classe leur importance par ordre décroissant. Les effets positifs sur les réponses sont représentés en gris et les effets négatifs sur les réponses sont donnés en bleu. Une barre verticale sur le diagramme de Pareto représente la limite de significativité. Si l'histogramme dépasse cette barre, l'effet est significatif, dans le cas contraire, il n'est pas significatif. La valeur à laquelle se positionne cette barre est déterminée par la loi de Student à n^2 degré de liberté avec un risque de 5%. On note d'après ces figures que certains effets ne sont pas significatifs et qui doivent être retirés du modèle.

Tableau 10: Analyse de la variance et les coefficients de régression des réponses étudiées

	Rendement		Délitescence		IPMT		Indice de solubilité		Indice de brun	
	P	Coefficient	P	Coefficient	P	Coefficient	P	Coefficient	P	Coefficient
Constante	-	-78,75	-	33,32	-	-37,275	-	-13,44	-	12,175
A:Taux Hydratation	0,011	3,375	0,122	-0,753	0,046	2,775	0,0435	0,418	0,148	0,49
B:Température de l'eau d'hydratation	0,012	0,012	0,0701	-0,664	0,036	1,723	0,0157	0,553	0,151	-0,57
C:Semoule	0,071	43,224	0,134	4,838	0,019	12,319	0,0737	2,004	0,149	-1,988
AB	0,364	-0,008	0,275	0,02	0,238	-0,039	0,0826	-0,013	0,500	0,0139
AC	0,034	-1,109	0,450	-0,12	0,551	-0,144	0,1891	-0,061	0,684	0,083
BC	0,022	-0,152	0,569	0,008	0,086	-0,113	0,1166	0,009	0,218	-0,0389
	Indice de jaune		Gonflement à froid		Gonflement à chaud		D50		Sg	
	P	Coefficient	P	Coefficient	P	Coefficient	P	Coefficient	P	Coefficient
Constante	-	26,11	-	44,583	-	-74,97	-	510,0	-	1,637
A:Taux Hydratation	0,037	0,063	0,116	7,917	0,014	16,458	0,0634	8,75	0,046	-0,012
B:Température de l'eau d'hydratation	0,012	0,365	0,108	-0,777	0,013	4,582	0,1144	1,821	0,021	-0,01
C:Semoule	0,0007	1,968	0,549	-43,125	0,032	15,952	0,0296	39,198	0,091	0,086
AB	0,015	-0,009	1,000	1,136	0,111	-0,161	0,7041	-0,038	0,164	0,0002
AC	1,0000	0,0	0,605	1,042	0,258	-0,729	0,7041	-0,418	0,178	-0,002
BC	0,006	0,0229	0,263	0,303	0,041	0,445	0,0903	-0,53	0,079	-0,0005

La figure 27 représente les diagrammes de Pareto après avoir retiré les effets non significatifs. L'analyse de ces diagrammes permet de tirer les observations suivantes :

- Tous les facteurs étudiés montrent un effet significatif ($p < 0,05$) sur les rendements en couscous. Alors que, le taux d'hydratation et la semoule ont des effets positifs, la température présente un effet négatif. Les effets de la température et du taux d'hydratation sont plus importants que celui de la semoule. Les interactions semoule-taux d'hydratation et semoule-température ont des effets significatifs ($p < 0,05$) négatifs mais l'interaction taux d'hydratation-température n'a pas d'effet sur les rendements (figure 27 (A)).
- Pour la délitescence seuls les effets principaux ont un effet significatif ($p < 0,05$). Les effets de la température et de la semoule sont positifs tandis que celui du taux d'hydratation est négatif. Le facteur le plus influant est la température de l'eau d'hydratation. Par contre, les effets des interactions température-taux d'hydratation, taux d'hydratation-semoule et température-semoule ne sont pas significatifs (figure 27 (B)).
- Dans le cas de l'IPMT tous les facteurs principaux sont significatifs ($p < 0,05$) positifs. On note aussi que le facteur le plus influant est la semoule. L'interaction semoule-température présente le seul effet significatif ($p < 0,05$) négatif (figure 27 (C)).
- L'indice de solubilité est influencé positivement ($p < 0,05$) et uniquement par la température de l'eau d'hydratation (figure 27 (D)).
- L'indice de brun est influencé à part égale par les trois facteurs principaux. Les effets de la température et de la semoule sont significatifs ($p < 0,05$) positifs. Concernant, l'effet des interactions on remarque que l'interaction semoule-température présente un effet significatif ($p < 0,05$) négatif (figure 27 (E)).
- En revanche, pour l'indice de jaune tous les facteurs principaux sont significatifs ($p < 0,05$). L'effet de la semoule est le plus important et il est significativement positif. Par contre, les effets de la température significativement positif et du taux d'hydratation significativement négatif sont beaucoup moins importants. L'effet de l'interaction semoule-température est significatif ($p < 0,05$) positif et il est plus élevé que l'effet de l'interaction température-taux d'hydratation qui est significatif ($p < 0,05$) négatif. En revanche, l'effet de l'interaction semoule-taux d'hydratation est non significatif (figure 27 (F)).
- Dans le cas du gonflement à froid et concernant les effets principaux on observe un effet significatif ($p < 0,05$) positif du taux d'hydratation et un effet significatif ($p < 0,05$) négatif de la température. Ces deux effets sont les plus élevés et leur importance est similaire. Alors que, l'effet de la semoule est non significatif mais il est négatif. En revanche, l'effet de

l'interaction température-semoule est significatif ($p < 0,05$) positif. Dans l'analyse des plans d'expériences, par convention, si un terme non significatif est présent dans une interaction significative, le paramètre le devient également. Donc, on peut conclure que l'effet de la semoule est significatif. Les interactions température-taux d'hydratation et semoule-taux d'hydratation sont non significatifs (figure 27 (G)).

- En ce qui concerne le gonflement à chaud on note que tous les effets principaux sont significatifs ($p < 0,05$). Les effets de la température et du taux d'hydratation sont plus élevés que l'effet de la semoule. L'influence de la température et de la semoule est négative et celle du taux d'hydratation est positive (figure 27 (H)).
- Les trois facteurs étudiés ont eu un effet significatif ($p < 0,05$) positif sur la D50. Mais, le facteur le plus influant est la semoule. Concernant l'effet des interactions on remarque que seule l'interaction température-semoule présente un effet significatif ($p < 0,05$) négatif. Tandis que, les effets des interactions température-taux d'hydratation et semoule-taux d'hydratation sont non significatifs (figure 27 (I)).
- Sur le Sg les effets de la température et du taux d'hydratation sont significatifs ($p < 0,05$) négatifs. L'effet de la température est plus important que celui du taux d'hydratation. Cependant, les effets de la semoule et des interactions sont non significatifs (figure 27 (J)).

Le résidu représente les sources d'inadéquations du modèle expérimental par rapport au modèle théorique.

Les valeurs des résidus des réponses étudiées sont regroupées dans le tableau 11. La représentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour les réponses étudiées sont illustrées dans l'Annexe B. On note d'après ces figures une variance homogène des résidus en fonction des valeurs prédites, ce qui permet d'affirmer l'hypothèse de normalité des résidus

La comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales est illustrée par la figure 28 Ces graphiques représentent les valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales des réponses étudiées, plus les points sont proches de la droite théorique (de pente égale à 1 et passant par 0), plus le modèle est adéquat. On remarque d'après ces graphiques que sur l'ensemble des réponses étudiées les points sont plutôt proches de la droite. De ce fait, les modèles mathématiques obtenus sont adéquats.

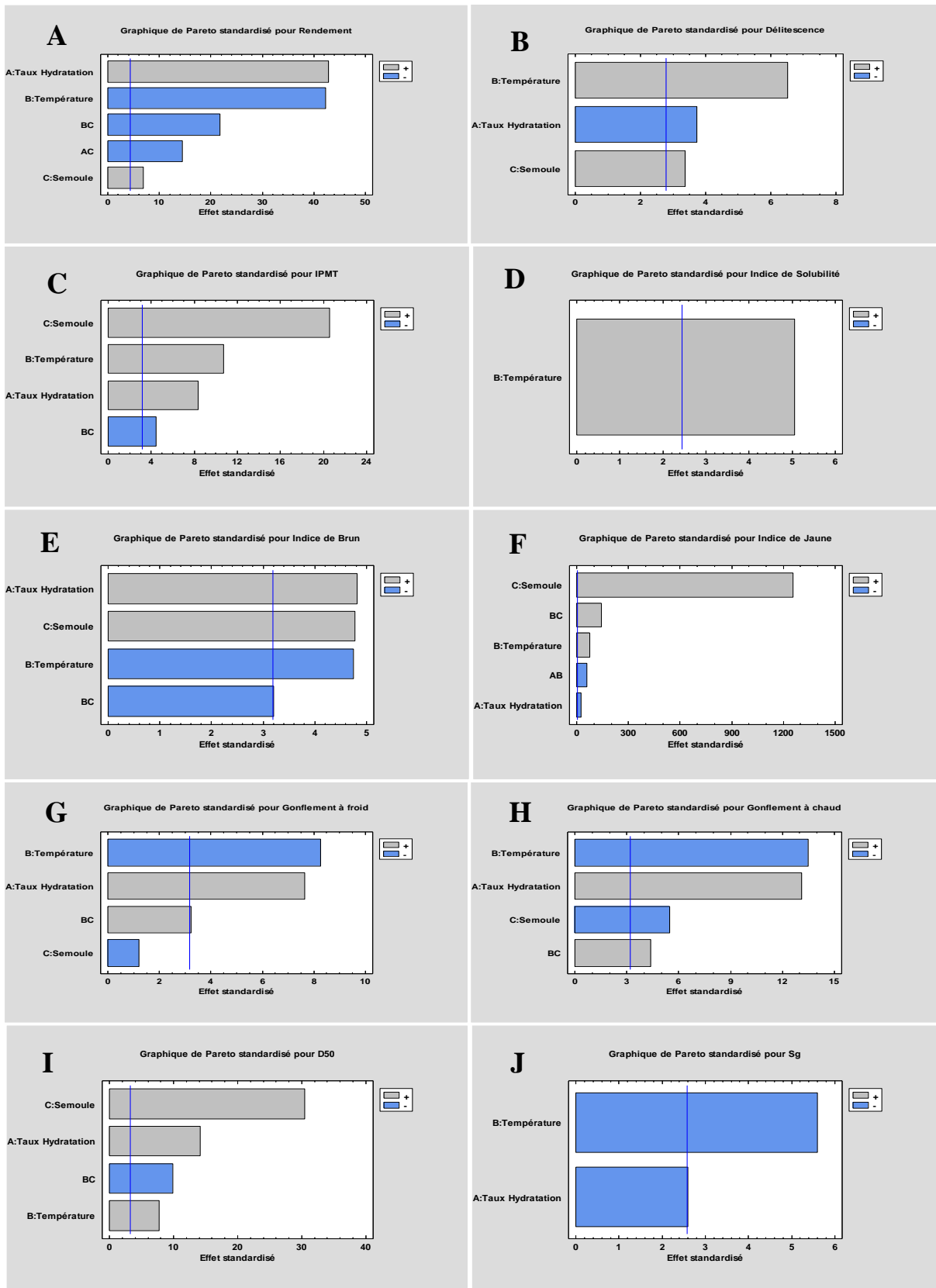


Figure 27 : Diagrammes de Pareto des réponses : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J)

Tableau 11 : Valeurs des résidus des réponses étudiées

	Rendement			Délitescence			IPMT			Indice de solubilité			Indice de brun		
	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu
1	39,5	39,441	0,059	5,61	5,713	-0,103	55,65	55,481	0,169	1,81	1,791	0,019	28,68	28,833	-28,833
2	48,35	48,409	-0,059	4,55	4,448	0,102	61,15	61,319	-0,169	2,73	2,749	-0,019	29,8	29,648	-29,648
3	40,52	40,579	-0,059	7,57	7,468	0,102	77,5	77,669	-0,169	3,52	3,539	-0,019	30,28	30,128	-30,128
4	46	46,059	-0,059	6,85	6,748	0,102	69,6	69,769	-0,169	1,37	1,389	-0,019	30,95	30,798	-30,798
5	36,47	36,411	0,059	8,22	8,322	-0,102	74,3	74,131	0,169	3,42	3,401	0,019	28,22	28,373	-28,373
6	45,15	45,091	0,059	6,48	6,583	-0,103	69,1	68,931	0,169	3,8	3,781	0,019	29,39	29,543	-29,543
7	36,43	36,489	-0,059	7,06	6,958	0,102	64,65	64,819	-0,169	3,38	3,399	-0,019	28,27	28,118	-28,118
8	50,65	50,591	0,059	4,9	5,003	-0,103	75,2	75,031	0,169	2,12	2,101	0,019	31,79	31,943	-31,943
	Indice de jaune			Gonflement à froid			Gonflement à chaud			D50			Sg		
	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu	Valeurs mesurées	Valeurs prédites	Résidu
1	26,39	26,393	-0,003	336,667	335,208	1,459	527,5	527,813	-0,313	800	801,668	-1,668	1,213	1,214	-0,001
2	26,52	26,518	0,002	347,5	348,958	-1,458	562,5	562,187	0,313	820	818,332	1,668	1,195	1,195	0
3	31,01	31,008	0,002	330	331,458	-1,458	515	514,687	0,313	863,33	863,332	-0,002	1,147	1,159	-0,012
4	30,33	30,328	0,002	322,5	323,958	-1,458	507,5	507,187	0,313	850	849,168	0,832	1,22	1,214	0,006
5	31,3	31,303	-0,003	315	313,542	1,458	490	490,313	-0,313	846,67	846,668	0,002	1,163	1,174	-0,011
6	26,06	26,063	-0,003	326,667	325,208	1,459	518,333	518,646	-0,313	838,33	839,162	-0,832	1,17	1,159	0,011
7	26,36	26,358	0,002	310	311,458	-1,458	491,667	491,354	0,313	823,33	822,497	0,833	1,18	1,174	0,006
8	30,45	30,453	-0,003	343,333	341,875	1,458	538,33	538,643	-0,313	865	865,832	-0,832	1,191	1,195	-0,004

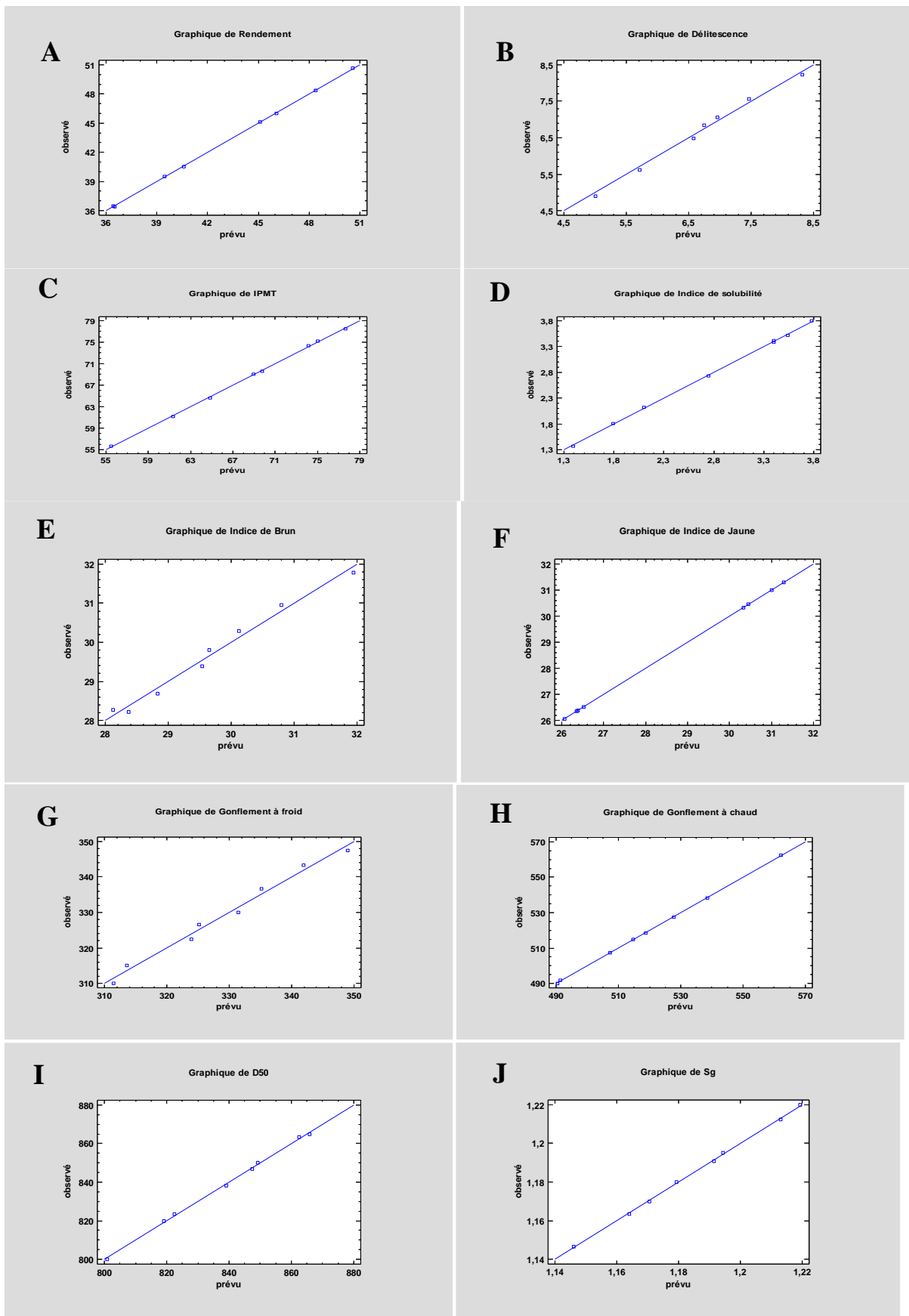


Figure 28 : Evolution des valeurs observées avec les valeurs prédites pour : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J)

Afin de simplifier les modèles, les termes des effets non significatifs de l'équation sont annulés. Les modèles adéquats au niveau de signification au seuil de 5% sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Modèles de régression des différentes réponses étudiées traduisant l'effet des conditions d'hydratation

Variable dépendante	Modèle de régression
Rendement	$Y_1 = -75,374 + 3,284*X_1 - 0,295*X_2 + 43,224*X_3 - 1,109*X_1*X_3 - 0,152*X_2*X_3$
Délitescence	$Y_2 = 25,088 - 0,53*X_1 + 0,084*X_2 + 0,48*X_3$
IPMT	$Y_3 = -21,319 + 2,344*X_1 + 0,272*X_2 + 7,0*X_3 - 0,113*X_2*X_3$
Indice de solubilité	$Y_4 = 2,008 + 0,069*X_2$
Indice de brun	$Y_5 = 6,533 + 0,643*X_1 - 0,058*X_2 + 1,065*X_3 - 0,039*X_2*X_3$
Indice de jaune	$Y_6 = 26,11 + 0,063*X_1 + 0,365*X_2 + 1,968*X_3 - 0,009*X_1*X_2 + 0,023*X_2*X_3$
Gonflement à froid	$Y_7 = 44,583 + 7,917*X_1 - 0,777*X_2 - 3,333*X_3 + 0,303*X_2*X_3$
Gonflement à chaud	$Y_8 = -9,465 + 14,687*X_1 - 1,373*X_2 - 11,043*X_3 + 0,445*X_2*X_3$
D50	$Y_9 = 525,447 + 8,333*X_1 + 0,417*X_2 + 23,75*X_3 - 0,53*X_2*X_3$
Sg	$Y_{10} = 1,544 - 0,009*X_1 - 0,002*X_2$

3-3-Influence des facteurs significatifs

3-3-1-Effets principaux

L'influence des facteurs étudiés sur chaque réponse est illustrée par les graphiques des effets principaux figure 29.

D'après la figure 29 (A) on note que les rendements en couscous sont meilleurs lorsque le taux d'hydratation et la semoule sont à leurs niveaux hauts et la température est à son niveau bas. On remarque aussi que l'influence de la température et l'influence du taux d'hydratation sont plus importantes que celle de la semoule.

La délitescence enregistre des valeurs maximales lorsque le taux d'hydratation est au niveau bas et la température et la semoule sont au niveau haut (figure 29 (B)). Cette figure montre aussi que la température est le facteur qui présente la plus grande influence sur la délitescence.

La figure 29 (C) fait apparaître que l'IPMT augmente pour des niveaux hauts en taux d'hydratation, en température et en semoule. Le facteur le plus influant sur l'IPMT est la semoule.

Selon la figure 29 (D) on remarque que l'indice de solubilité est plus élevé lorsque la température et le taux d'hydratation sont au niveau haut et la semoule au niveau bas. De plus, le facteur le plus important sur l'indice de solubilité est la température.

Pour l'indice de brun la figure 29 (E) montre que cet indice augmente lorsque le taux d'hydratation et la semoule sont au niveau haut et la température est au niveau bas. Il ressort aussi que tous les facteurs présentent une importance comparable.

L'indice de jaune augmente pour un niveau taux d'hydratation bas et un niveau de température et de semoule haut (figure 29 (F)). On remarque aussi que le seul facteur influant sur cet indice est la semoule.

Concernant la capacité d'hydratation du couscous, le gonflement à froid (figure 29 (G)) et le gonflement à chaud (figure 29 (H)), l'analyse de ces figures fait ressortir que la capacité d'hydratation est élevée pour un niveau haut en taux d'hydratation et des niveaux bas pour la semoule et la température. Les facteurs les plus importants pour ces indices sont la température et le taux d'hydratation.

Les valeurs de la D50 augmentent lorsque le taux d'hydratation, la température et la semoule sont à leurs niveaux hauts. Le facteur le plus influant sur ce paramètre est la semoule (figure 29 (I)).

Le Sg diminue pour des niveaux hauts en taux d'hydratation, en température et en semoule. Le facteur qui présente l'effet le plus important est la température de l'eau d'hydratation (figure 29 (J)).

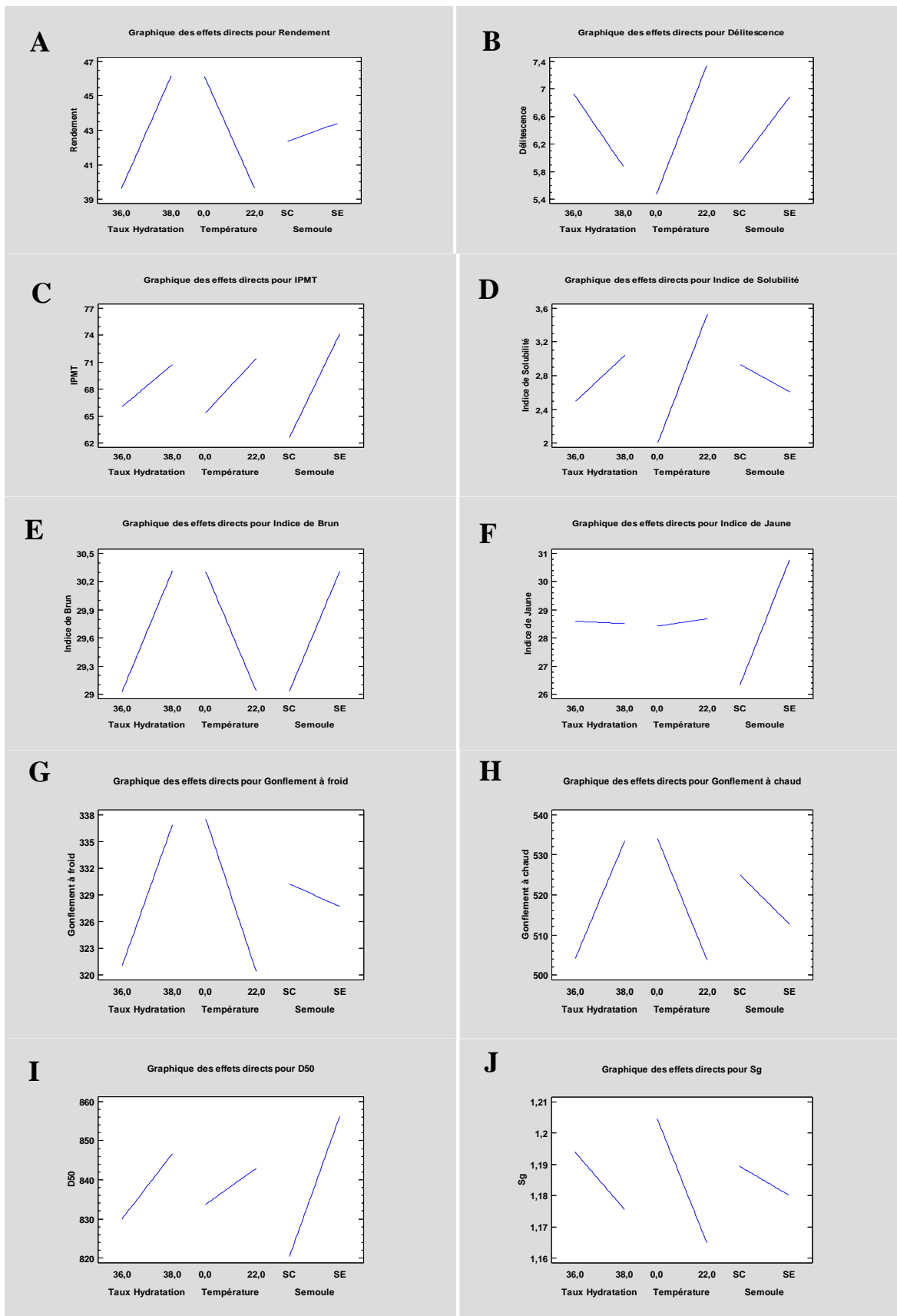


Figure 29 : Les effets principaux sur les différentes réponses : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT(C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D 50 (I), Sg (J)

L'influence des facteurs étudiés sur chaque réponse est présentée par les graphiques en surface de réponse à trois dimensions (figure 30). Pour chaque réponse, seule l'influence des facteurs significatifs est étudiée.

On note d'après la figure 30 (A) que les facteurs qui présentent le plus grand effet sur le rendement sont le taux d'hydratation et la température de l'eau d'hydratation. En effet, plus le taux d'hydratation augmente meilleur est le rendement en couscous. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Guezlane (1993) et Dahoun-Lefkir, (2005). Tandis que, l'effet de la température est inversement proportionnel au rendement. Ils augmentent au fur et à mesure que la température de l'eau d'hydratation diminue. Ces résultats confirment ceux observés par Dahoun-Lefkir, (2005).

Les facteurs les plus influant sur la délitescence sont la température et le taux d'hydratation. La figure 30 (B) montre que la délitescence du couscous diminue avec l'augmentation du taux d'hydratation et la diminution de la température.

La figure 30 (C) représente l'évolution de l'IPMT en fonction de la semoule et de la température. On remarque d'après cette figure que les couscous issus de la semoule courante enregistrent les valeurs les plus faibles en IPMT par rapport aux couscous de la semoule extra. Ceci revient probablement à la teneur plus élevée en lipide de la semoule courante (1,075%ms) par rapport à la semoule extra (0,746%ms). En effet, l'addition de la matière grasse améliore le collant du couscous (Aboubacar et Hamaker, 2000; Ounane *et al.*, 2006). On note aussi que l'IPMT diminue au fur et à mesure que la température de l'eau d'hydratation diminue. Donc, les basses températures améliorent le collant du couscous.

La figure 30 (D) montre l'évolution de l'indice de solubilité en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation. Il ressort de cette figure que les valeurs les plus faibles de l'indice de solubilité sont enregistrées lorsque le taux d'hydratation et la température diminuent. En effet, l'augmentation du taux d'hydratation provoque une augmentation de l'indice de solubilité. Ceci peut être expliqué par la gélatinisation de l'amidon. Selon Hafsa *et al.* (2015), avec l'augmentation du taux d'hydratation, il ya plus d'amidon gélatinisé qui augmente l'indice de solubilité.

L'évolution de l'indice de brun en fonction de la température et du taux d'hydratation est illustrée dans la figure 30 (E). L'analyse de cette figure fait apparaître que l'indice de brun augmente avec l'accroissement du taux d'hydratation et la diminution de la température.

Les indices de jaune des couscous roulés avec la semoule extra sont plus élevés que ceux fabriqués avec la semoule courante (figure 30 (F)).

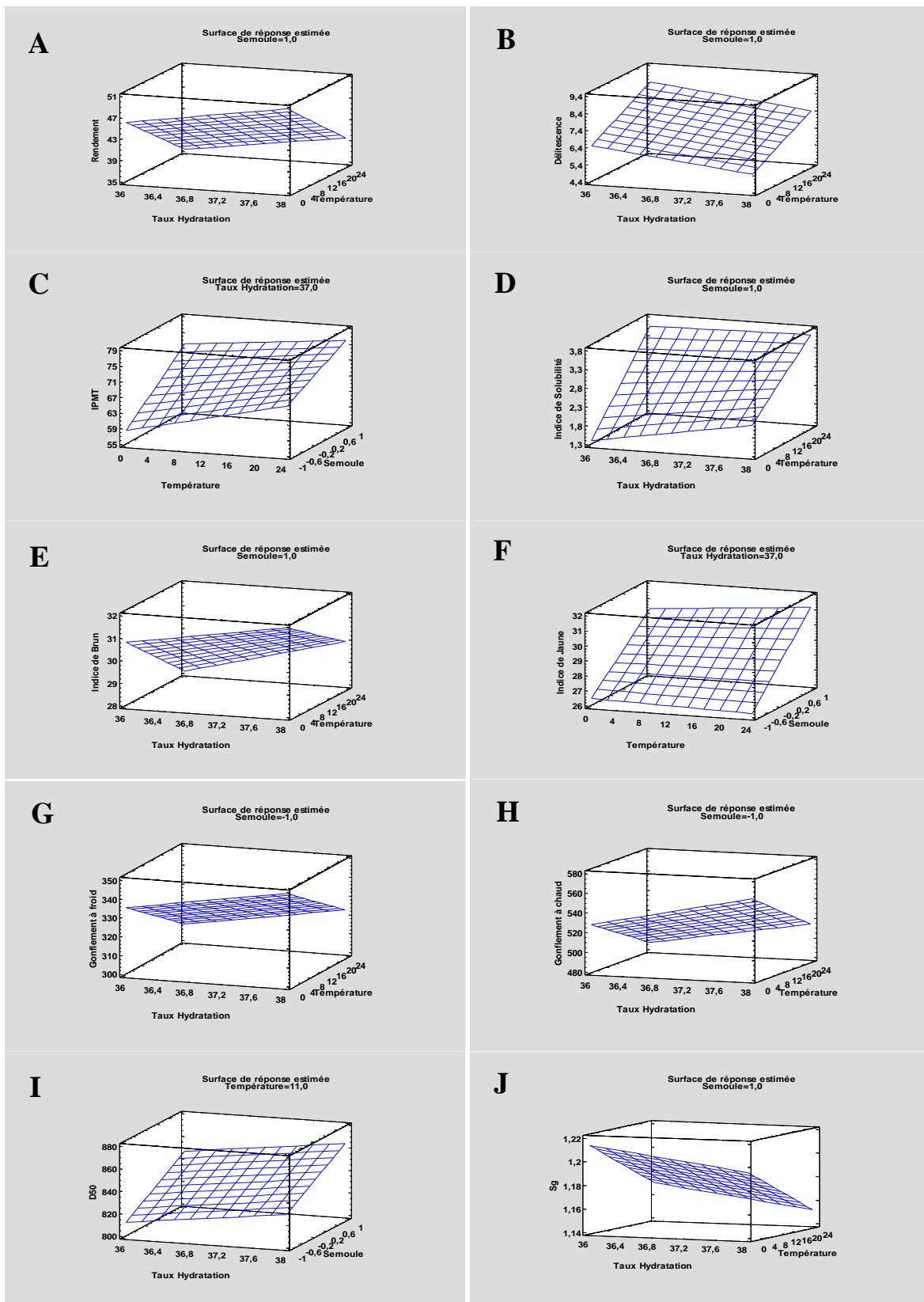


Figure 30 : Surfaces des réponses des facteurs significatifs sur : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J)

L'évolution de la capacité d'hydratation du couscous en fonction du taux d'hydratation et de la température est représentée dans les figures 30 (G) et (H) pour le gonflement à froid et le gonflement à chaud respectivement. Il ressort de ces figures que plus la température de l'eau d'hydratation est faible plus la capacité d'hydratation des couscous est élevée. Par contre, le gonflement à froid et le gonflement à chaud sont proportionnels aux taux d'hydratation.

En ce qui concerne la D50 l'analyse de la figure 30 (I) fait apparaître que la D50 du couscous augmente avec l'accroissement du taux d'hydratation pour les deux semoules étudiées. Toutefois, on remarque que la D50 est d'autant plus élevée quand le taux d'hydratation augmente et la semoule extra est utilisée. Ceci revient à la finesse de la semoule extra par rapport à la semoule courante. Ces résultats corroborent les travaux de Tigroudja et Bendjoudiouadda (1999), qui ont indiqué que les semoules fines à taux élevés d'hydratation donnaient des couscous de granulométrie élevée.

On note selon la figure 30 (J) que le Sg diminue au fur et à mesure que le taux d'hydratation ainsi que la température de l'eau d'hydratation augmentent.

3-3-2-Effets d'interactions

Les effets des interactions sur les réponses sont regroupés dans la figure 31. L'analyse de ces figures permet de noter les observations suivantes :

- L'effet du taux d'hydratation sur les rendements en couscous est plus élevé lorsque la température de l'eau d'hydratation est au niveau bas (0°C). Cette interaction est très faible puisque les deux droites ont presque la même pente. L'effet du taux d'hydratation et de la température sur le rendement est plus élevé lorsque la semoule extra est utilisée. Ces interactions sont fortes puisque les 2 droites se croisent pour chaque interaction (figure 31 (A)).
- L'effet du taux d'hydratation sur la délitescence est un peu plus élevé quand la température est élevée (22°C) et la semoule extra est utilisée. L'effet de la température sur la délitescence est élevé lorsqu'on utilise la semoule extra. Les interactions taux d'hydratation-température et taux d'hydratation-semoule sont faibles car les droites ne se croisent pas mais elles peuvent se croiser. Tandis que, l'interaction température-semoule est très faible puisque les 2 droites sont pratiquement parallèles (figure 31 (B)).
- L'effet du taux d'hydratation sur l'IPMT est plus élevé lorsque la température est au niveau haut (22°C) et la semoule extra est utilisée. L'effet de la température sur l'IPMT est

élevé quand on utilise la semoule extra. Les interactions taux d'hydratation-température et température-semoule sont faibles car les droites ne se croisent pas mais elles peuvent se croiser. Alors que, l'interaction taux d'hydratation-semoule est très faible puisque les 2 droites sont presque parallèles (figure 31 (C)).

- L'effet du taux d'hydratation sur l'indice de solubilité est très élevé quand la température est élevée (22°C). L'effet du taux d'hydratation et de la température sur l'indice de solubilité est légèrement plus élevé lorsque la semoule courante est utilisée. Ces interactions sont faibles car les droites ne se croisent pas mais elles ont tendance à se croiser (figure 31 (D)).
- L'effet du taux d'hydratation sur l'indice de brun est un peu plus élevé quand la température de l'eau d'hydratation est faible (0°C). L'effet du taux d'hydratation et de la température sur l'indice de brun est plus élevé lorsque la semoule extra est utilisée. Ces interactions sont faibles car les droites ne se croisent pas mais elles peuvent se croiser (figure 31 (E)).
- L'effet du taux d'hydratation sur l'indice de jaune est légèrement plus élevé quand la température de l'eau d'hydratation augmente (22°C). Cette interaction est élevée puisque les deux droites se croisent. L'effet du taux d'hydratation et de la température sur l'indice de jaune est très élevé lorsque la semoule extra est utilisée. L'interaction température-semoule est faible puisque les droites ne se croisent pas mais elles peuvent se croiser. Mais, l'interaction taux d'hydratation-semoule est très faibles car les pentes des 2 droites sont presque identiques (figure 31 (F)).
- L'effet du taux d'hydratation est très élevé sur le gonflement à froid et le gonflement à chaud quand la température de l'eau d'hydratation est faible (0°C). Cette interaction est très faible car les droites sont presque parallèles. L'effet du taux d'hydratation et de la température sur le gonflement à froid et le gonflement à chaud est élevé lorsque la semoule courante est utilisée. L'interaction taux d'hydratation-semoule est faible dans le cas du gonflement à froid car les droites ne se croisent pas mais elles ont tendance à se croiser. En revanche, cette interaction est très faible pour le gonflement à chaud puisque les 2 droites sont presque parallèles. L'interaction température-semoule est forte dans le cas du gonflement à froid puisque les droites sont croisées par contre elle est faible pour le gonflement à chaud car les droites ne se croisent pas mais elles ont tendance à se croiser (figures 31 (G) et (H)).
- L'effet du taux d'hydratation sur la D50 est légèrement élevé lorsque la température est à son niveau haut (22°C) et la semoule extra est utilisée. Les interactions taux d'hydratation-

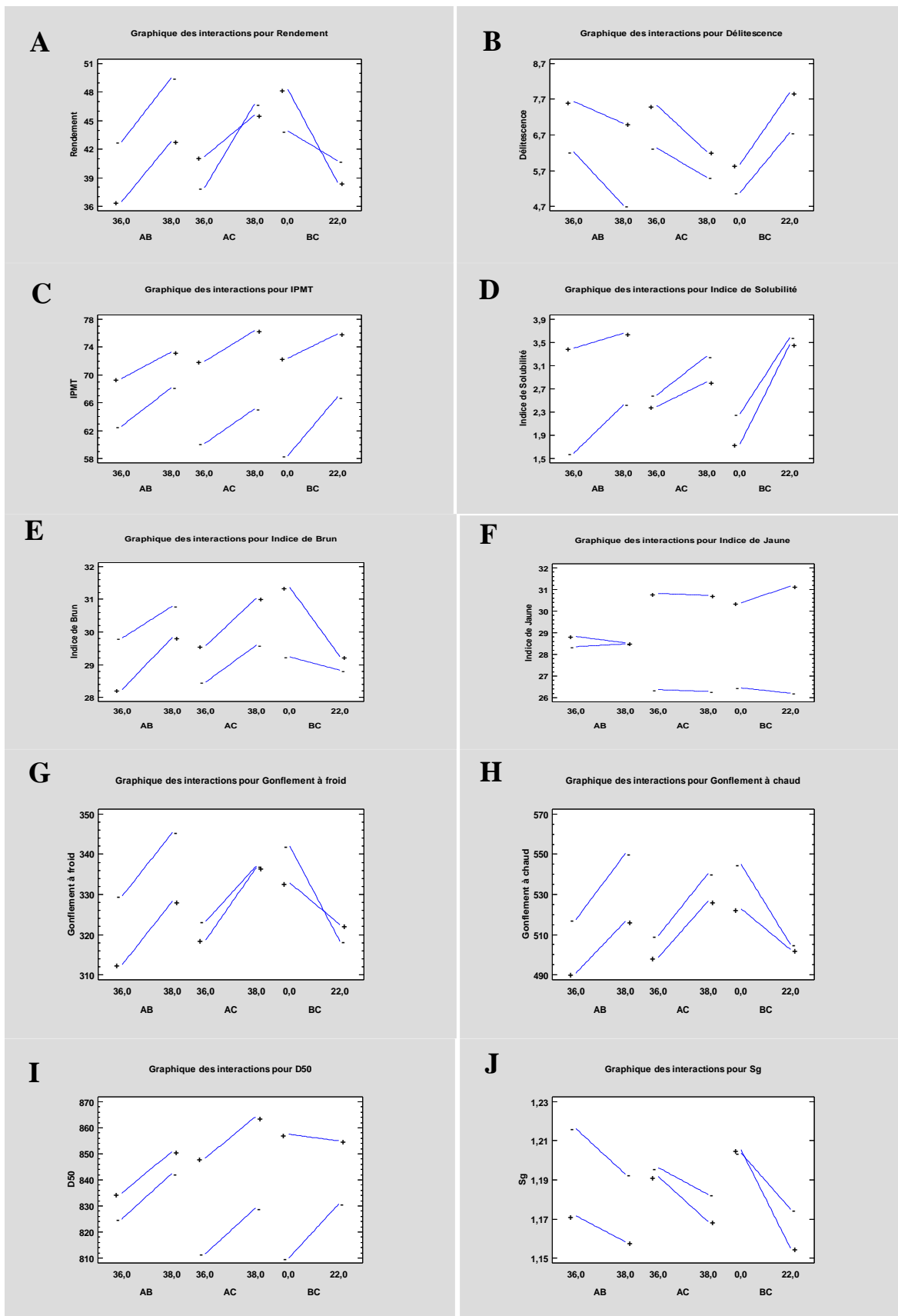


Figure 31 : Les effets des interactions sur les différentes réponses : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J)

température et taux d'hydratation-semoule sont très faibles puisque les droites ont presque les mêmes pentes. L'effet de la température sur la D50 est élevé quand la semoule extra est utilisée. L'interaction température-semoule est faible car les 2 droites ne se croisent pas mais elles peuvent se croiser (figure 31 (I)).

- L'effet du taux d'hydratation sur le Sg est très élevé quand la température est faible (0°C). Les effets du taux d'hydratation et de la température sur le Sg sont légèrement élevés lorsque la semoule courante est utilisée. L'interaction taux d'hydratation-température est très faible car les droites ont presque la même pente. L'interaction taux d'hydratation-semoule est faible puisque les droites ne se croisent pas mais elles peuvent se croiser. Par contre, l'interaction température-semoule est forte puisque les droites se croisent (figure 31 (J)).

3-4-Optimisation des conditions d'hydratation

L'optimisation multi-réponses trouve la bonne combinaison de facteurs qui permet d'optimiser à la fois plusieurs réponses, de connaître les valeurs du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation à appliquer et le choix de la semoule à utiliser. L'optimisation des conditions d'hydratation du couscous devra donc prendre en compte plusieurs critères. Il s'agit de maximiser certaines réponses tout en minimisant d'autre. L'objectif dans ce travail est de maximiser la fonction de désirabilité.

Le but de l'optimisation des conditions d'hydratation et d'obtenir le meilleur rendement possible en couscous mais cette optimisation ne doit pas être au détriment de la qualité du produit fini. En effet, plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude de la qualité du couscous. Selon Guezlane (1993), un couscous de "bonne qualité" est un produit jaune ambré, d'une capacité d'absorption d'eau élevée, ses grains restent individualisés et fermes une fois hydratés. Les valeurs élevées du gonflement de couscous sont indicatives d'un produit de haute qualité (Guezlane et Abecassis, 1991; Guezlane, 1993; Ounane *et al.*, 2006). Les valeurs basses de l'indice de solubilité dans l'eau, de l'indice de prise en masse de couscous et de la délitescence du couscous sont indicatives des produits de haute qualité (Ounane *et al.*, 2006). La couleur des pâtes se caractérise par deux composantes : l'indice de jaune et l'indice de brun. Plus l'indice de brun est faible, meilleur est la qualité (Bar, 2001). La dispersion géométrique (Sg) permet d'évaluer l'homogénéité des produits. Plus cet indice est élevé plus la dispersion est importante (Guezlane, 1993). Le *codex alimentarius* (CODEX STAN 202-1995) indique que la granulométrie du couscous doit être comprise entre 630 et 2000 μm . Il

ressort donc de ces travaux que le rendement en couscous, l'indice de jaune, le gonflement à froid, le gonflement à chaud et la D50 doivent être maximisés. Et la délitescence, l'IPMT, l'indice de solubilité, l'indice de brun et le Sg doivent être minimisés.

Pour optimiser les différentes réponses étudiées, les niveaux des facteurs à fixer sont regroupés dans le tableau 13. La maximisation du rendement, du gonflement à froid, du gonflement à chaud et de la D50 et la minimisation de la délitescence sont obtenues par le taux d'hydratation le plus élevé (38%) et la température de l'eau d'hydratation la plus basse (0°C).

Les conditions d'hydratation pour minimiser l'IPMT et l'indice de solubilité correspondent au taux d'hydratation 36% et à la température 0°C. En revanche, pour maximiser l'indice de jaune et minimiser l'indice de brun il faut diminuer le taux d'hydratation à 36% et augmenter la température à 22°C. Tandis que, pour minimiser le Sg le taux d'hydratation doit être élevé à 38% et la température doit être augmentée à 22°C. En ce qui concerne la semoule utilisée pour la fabrication du couscous on remarque d'après l'analyse du tableau (13) que la semoule extra permet d'optimiser le rendement, l'indice de jaune, le Sg et la D50. Alors que, la semoule courante permet d'optimiser la délitescence, l'IPMT, l'indice de solubilité, l'indice de brun, le gonflement à froid et le gonflement à chaud.

Tableau 13 : Valeurs optimales des réponses en fonction des valeurs optimales des facteurs

Réponse	But	Valeur Optimum	Taux d'hydratation (%)	Température de l'eau d'hydratation (°C)	Semoule
Rendement	Maximiser	50,5	38	0	SE
Délitescence	Minimiser	4,47	38	0	SC
IPMT	Minimiser	56,06	36	0	SC
Indice de solubilité	Minimiser	2,01	36	0	SC
Indice de brun	Minimiser	28,19	36	22	SC
Indice de jaune	Maximiser	31,3	36	22	SE
Gonflement à froid	Maximiser	350	38	0	SC
Gonflement à chaud	Maximiser	559,69	38	0	SC
D50	Maximiser	865,83	38	0	SE
Sg	Minimiser	1,16	38	22	SE

Les résultats des valeurs à l'optimum de l'optimisation multi-réponse sont présentés dans le tableau 14. D'après ce tableau, il ressort que les valeurs des réponses à l'optimum après l'optimisation multi-réponse sont différentes de celles de l'optimisation de chaque réponse à part (tableau 13). En effet, les réponses qui doivent être maximisées à savoir le rendement, l'indice de jaune, le gonflement à froid, le gonflement à chaud et la D50

diminuent après l'optimisation multi-réponse. Alors que, les réponses qui doivent être minimisées augmentent. L'obtention de l'optimum nécessite donc de faire un compromis au niveau des réponses.

Les valeurs de la désirabilité des différentes réponses sont regroupées dans le tableau 14. On remarque d'après ce tableau que le rendement, la délitescence, l'indice de solubilité, l'indice de jaune, le gonflement à froid, le gonflement à chaud et la D50 ont une désirabilité supérieure à 50%. Or l'indice de brun, l'IPMT et le Sg présentent une désirabilité inférieure à 50%. Ce qui montre que ces dernières réponses ont été moins optimisées que les autres réponses.

La désirabilité optimisée ainsi que les valeurs des facteurs à l'optimum sont présentées dans le tableau 15. L'analyse de ce tableau montre que pour atteindre la désirabilité optimisée (0,498) qui permet d'avoir le meilleur rendement en couscous et la meilleure qualité du couscous possible, la semoule doit être hydratée à 37,595% avec une eau à une température de 4,443°C et une semoule extra.

L'évolution de la désirabilité en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation pour la semoule extra et pour la semoule courante est illustrée dans la figure 32. Cette figure montre que la désirabilité augmente avec l'accroissement du taux d'hydratation et la diminution de la température pour la semoule extra figure 32 (A) et la semoule courante figure 32 (B). Cependant, on remarque que la désirabilité chute dans le cas de la semoule extra (figure 32 (A)) quand le taux d'hydratation et la température atteignent 38% et 0°C respectivement. L'analyse de tous ces résultats fait ressortir que les conditions d'hydratation dépendent de la semoule mise en œuvre. En effet, plusieurs travaux ont montré que les caractéristiques de la semoule comme la granulométrie et la composition biochimique influencent fortement l'hydratation de la semoule. Selon Hebrard *et al.* (2001), les compositions physico-chimiques et structurales de la semoule sont en relation avec ses propriétés d'hydratation et d'agglomération. La granulométrie de la semoule influence le taux d'hydratation, plus la semoule est fine plus elle absorbe l'eau (Aluka, 1981; Galiba *et al.*, 1988; Debbouz *et al.*, 1994; Tigroudja et Bendjoudiouadda, 1999; Hébrard *et al.*, 2003). D'après Hebrard *et al.* (2001), la dispersion granulométrique de la semoule est liée à la variation de sa composition biochimique. En effet, dans la semoule de blé dur, les particules les plus fines sont originaires des parties périphériques du grain. En conséquence, elles se distinguent par des teneurs plus élevées en protéines, pentosanes, amidon endommagé et

cellules de la couche à aleurone. Du fait de leurs plus fortes teneurs en pentosanes et amidon endommagé, les particules fines présentent une plus forte capacité d'adsorption d'eau. De plus, plusieurs autres travaux ont noté que les variations d'absorption de l'eau résultent des différences intrinsèques dans la teneur et la qualité en protéine (Debbouz *et al.*, 1994; Edwards *et al.*, 1996) et dans la teneur en amidon endommagé (Potus *et al.*, 1992; Viot, 1992; Edwards *et al.*, 1996).

Par ailleurs, on remarque d'après la figure 32 (B) que les valeurs des facteurs à l'optimum (taux d'hydratation 37,595% et température 4,443°C) de la désirabilité de la semoule extra sont incluses dans le domaine de la désirabilité de la semoule courante. Par contre les valeurs des facteurs à l'optimum (taux d'hydratation 38% et température 0°C) dans le cas de la désirabilité de la semoule courante sont situées en dehors du domaine optimal de la désirabilité de la semoule extra figure 32 (A). En conclusion, les valeurs des facteurs qui permettent d'optimiser le rendement et la qualité du couscous sont les suivants : un taux d'hydratation égale à 37,595% et une température égale à 4,443°C.

Tableau 14 : Valeurs des réponses à l'optimum en fonction de la désirabilité pour chaque réponse

Réponse	Prévision	Limite inférieure à 95,0%	Limite supérieure à 95,0%	Désirabilité
Rendement	47,633	47,023	48,244	0,789
Délicatescence	6,017	5,366	6,668	0,6
IPMT	74,5	72,941	76,06	0,166
Indice de solubilité	2,315	1,886	2,744	0,611
Indice de brun	31,324	30,581	32,067	0,18
Indice de jaune	30,556	30,543	30,57	0,858
Gonflement à froid	335,521	329,756	341,285	0,638
Gonflement à chaud	527,526	521,285	533,766	0,532
D50	861,95	858,667	865,233	0,941
Sg	1,191	1,179	1,203	0,394

Tableau 15 : Désirabilité optimisée ainsi que les valeurs des facteurs à l'optimum

Facteurs	Valeur	Désirabilité optimisée
Taux Hydratation (%)	37,595	0,498
Température de l'eau d'hydratation (°C)	4,443	
Semoule	SE	

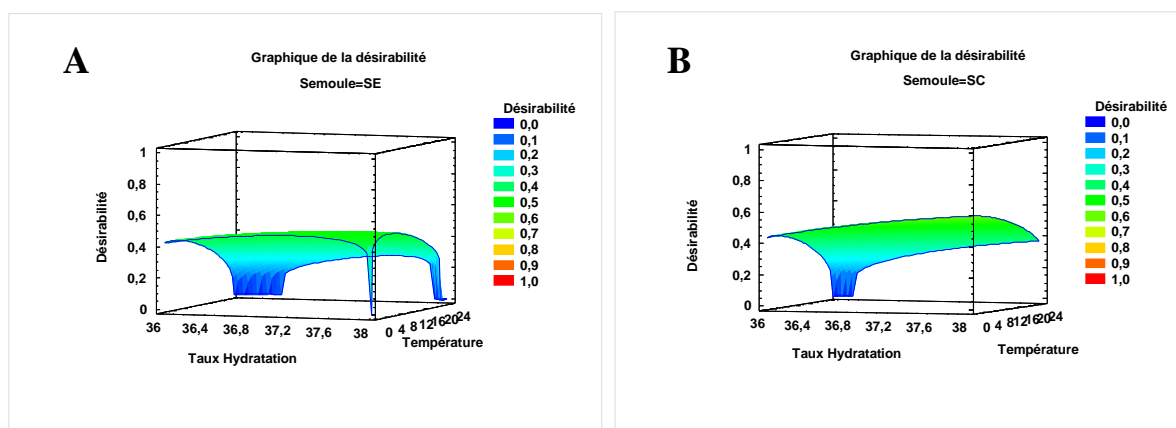


Figure 32 : Evolution de la désirabilité en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation : semoule extra (A) semoule courante (B)

Conclusion du chapitre III

Le but de l'optimisation des conditions de l'hydratation et d'obtenir le meilleur rendement possible en couscous mais cette optimisation ne doit pas être au détriment de la qualité du produit fini. A travers cette étude on a noté les observations suivantes :

- L'optimisation des conditions d'hydratation des différentes réponses étudiées fait ressortir que les niveaux des facteurs à fixer dépendent de la réponse. En effet, La maximisation du rendement, du gonflement à froid, du gonflement à chaud et de la D50 et la minimisation de la délitescence sont définies par le taux d'hydratation le plus élevé (38%) et la température la plus basse (0°C). Alors que, pour minimiser l'IPMT et l'indice de solubilité correspondent au taux d'hydratation 36% et à la température 0°C. En revanche, pour maximiser l'indice de jaune et minimiser l'indice de brun il faut diminuer le taux d'hydratation à 36% et augmenter la température à 22°C. Tandis que, pour minimiser le Sg le taux d'hydratation doit être élevé à 38% et la température doit être augmentée à 22°C.
- En ce qui concerne la semoule utilisée pour la fabrication du couscous les résultats obtenus montre que la semoule extra permet d'optimiser le rendement, l'indice de jaune, l'indice de solubilité, le Sg et la D50. Alors que, la semoule courante permet d'optimiser la délitescence, l'IPMT, l'indice de brun, le gonflement à froid et le gonflement à chaud.
- Les résultats des valeurs à l'optimum de l'optimisation multi-réponse sont différentes de celles de l'optimisation de chaque réponse à part. En effet, les réponses qui doivent être maximisées à savoir le rendement, l'indice de jaune, le gonflement à froid, le gonflement à chaud et la D50 diminuent après l'optimisation multi-réponse. Alors que,

les réponses qui doivent être minimisées augmentent. L'obtention de l'optimum nécessite donc de faire un compromis au niveau des réponses.

- En conclusion, les valeurs des facteurs qui permettent d'optimiser le rendement et la qualité du couscous sont les suivants : un taux d'hydratation égale à 37,595% et une température égale à 4,443°C.

Chapitre IV : Influences des conditions d'hydratation sur les modifications biochimiques des protéines

4-1- Influences des conditions d'hydratation sur les différentes fractions protéiques

Les protéines monomériques sont composées d'albumine, de globuline et de gliadine (Sapirstein et Fu, 1998). La gluténine soluble est constituée de sous-unités de gluténines de faible poids moléculaire (Hu *et al.*, 2007). La teneur en gluténines insolubles est considérée comme une expression déterminante de la qualité des protéines (Gupta *et al.*, 1992; Sapirstein et Fu, 1998).

Le pourcentage de polymères insolubles dans le SDS par rapport aux polymères totaux de gluténines est désigné par le pourcentage de protéine polymérique non extractible (% UPP) (Joubert *et al.*, 2018). La proportion de la fraction de polymère non extractible parmi les polymères de gluténines apparaît également comme un rapport important pour la réponse technologique (Gupta *et al.*, 1993; Jia *et al.*, 1996). De ce fait, le rapport des teneurs en gluténines insolubles (GI) sur les teneurs en gluténines totales (GI+GS) prédit mieux la qualité technologique des produits issus du blé.

Selon Dexter et Matsuo (1980), un rapport élevé entre gluténines et gliadines est un bon indice pour prédire une bonne qualité culinaire. Pour Suchy *et al.* (2003) le rapport gluténines/gliadines (IG/MP) refléterait très bien la qualité de la pâte. Les travaux de Uthayakumaran *et al.* (1999) et Uthayakumaran *et al.* (2000) soulignent le rôle du rapport gluténines/gliadines dans la détermination des propriétés de la pâte. Le rapport GI/MP, qui décrit partiellement le rapport de la gluténine à la gliadine, explique mieux la différence dans les propriétés rhéologiques que la proportion des gluténines insolubles (GI) (Suchy *et al.*, 2003).

4-1-1- Modifications des fractions protéiques après hydratation et roulage du couscous

Les teneurs en protéines des différentes fractions: protéines monomériques (PM), gluténines solubles (GS) et gluténines insolubles (GI) et les valeurs des ratios : gluténines insolubles/protéines monomériques (GI/PM) et gluténines insolubles/aux gluténines totales (gluténines solubles (GS)+gluténines insolubles (GI)) (GI/GS+GI) des semoules étudiées et des couscous roulés non précuits sont rassemblées dans le tableau 16.

Les teneurs en PM des semoules étudiées varient de 53,43% des protéines totales (PT) pour la semoule courante à 54,04% PT pour la semoule extra. Ces résultats sont plus élevés par rapport à ceux obtenus par Tazerout (2013) sur semoules commerciales avec des valeurs allant de 42,87% PT à 48,3% PT, mais comparables à ceux obtenus par Sapirstein *et al.* (2007) sur des variétés de blé dur avec des teneurs de 53,7% PT à 61,1% PT.

Les teneurs en GS des semoules étudiées varient de 12,09% PT pour la semoule courante à 12,8% PT pour la semoule extra. Ces résultats sont proches des valeurs trouvées par Tazerout (2013) (13,19% PT-14,62% PT) sur semoule commerciale et de Maghirang *et al.* (2006) (11,5% PT-18,4% PT) sur de blé dur.

Les teneurs en GI des semoules étudiées sont comprises entre 26,82% PT pour la semoule courante et 23,74% PT pour la semoule extra. Ces résultats sont en accords avec ceux obtenus par Tazerout (2013) (23,79% PT-29,99% PT) sur les semoules commerciales et plus élevés que ceux enregistrés par Sapirstein *et al.* (2007) (17% PT à 23,6% PT) sur des variétés de blé dur.

Il ressort de la comparaison des résultats (tableau 16), les teneurs en PM et en GS sont similaires pour les deux semoules alors que les teneurs en GI sont plus élevées pour la semoule courante par rapport à la semoule extra. L'analyse de la variance (tableau 19) fait apparaître un effet non significatif de la semoule sur les teneurs en PM et en GS et un effet hautement ($p < 0,01$) significatif de la semoule sur les teneurs en GI.

Les valeurs des ratios GI/PM des semoules varient de 0,44 à 0,50 pour la semoule extra et la semoule courante respectivement. De même, les valeurs des ratios GI/GS+GI des semoules sont comprises entre 0,66 pour la semoule extra et 0,68 pour la semoule courante. L'analyse de ces résultats en fonction de la semoule montre que la semoule courante présente les ratios les plus élevés. L'analyse de la variance (tableau 17) met en évidence un effet hautement significatif ($p < 0,01$) de la semoule sur le rapport GI/PM et un effet non significatif de la semoule sur le rapport GI/GI+GS.

L'influence des traitements (hydratation et roulage) du couscous sur les modifications biochimiques des protéines de la semoule de blé dur n'a fait l'objet d'aucune étude. Les travaux existants se rapportent aux études effectuées sur le pétrissage des pâtes alimentaires et de la pâte boulangère. Néanmoins, l'hydratation et le roulage du couscous montrent des similitudes avec le malaxage de la semoule des pâtes alimentaires.

Les teneurs en PM des CNP varient de 43,22% PT à 51,83% PT pour la semoule courante et de 41,7% PT à 52,95% PT pour la semoule extra. La comparaison des valeurs des PM des CNP avec ceux des semoules dont ils sont issus montre que les valeurs des PM des semoules diminuent après l'hydratation et le roulage des couscous. Les pourcentages des pertes en PM sont compris entre 2,98%-19,09% pour la semoule courante et entre 2,02%-22,83% pour la semoule extra (tableau 16). Cette diminution est probablement due à une diminution dans l'extractibilité des gliadines et des globulines. Wang *et al.* (2016) ont noté une diminution de l'extractibilité de la gliadine lors du malaxage de la pâte. Cette diminution indique qu'une partie des gliadines s'est associée aux gluténines par des interactions hydrophobes. Graveland *et al.* (1979), ont suggéré que lors de l'hydratation, les gluténines qui possèdent des propriétés adsorbantes, adsorbent les protéines solubles dans l'eau telles que les globulines. Cette adsorption fait intervenir des interactions hydrophobes.

L'évolution des teneurs des PM des CNP en fonction des conditions d'hydratation (tableau 16) montre que les PM diminuent au fur et à mesure que le taux d'hydratation et la température de l'eau d'hydratation augmentent pour les deux semoules utilisées. Donc, on peut supposer que l'augmentation du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation favorise les interactions entre gliadines et gluténines.

L'analyse de la variance (tableau 18) fait ressortir un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation, de la température de l'eau d'hydratation et du traitement de l'hydratation et du roulage du couscous sur les teneurs en PM des CNP.

Les teneurs en GS des CNP varient de 14,22% PT à 17,52% PT pour la semoule courante et de 15,79% PT à 17,95% PT pour la semoule extra. D'après ces résultats les valeurs des GS des CNP sont plus élevées que ceux de leurs semoules respectives. Les pourcentages d'augmentation varient de 11,18% à 36,98% pour la semoule courante et de 30,6% à 48,47% pour la semoule extra (tableau 18). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Icard-Verniere et Feillet (1999) ; Wang *et al.* (2016) et Joubert *et al.* (2018). Donc, les teneurs en GS ont augmenté durant l'hydratation et le roulage du couscous.

Tableau 16 : Teneurs des fractions protéiques des semoules et des couscous non précuits (CNP)

	PM (% PT)	Variations en PM (%) ⁽¹⁾	GS (% PT)	Variations en GS (%) ⁽²⁾	GI (% PT)	Variations en GI (%) ⁽³⁾	GI/PM	Variations en GI/PM (%) ⁽⁴⁾	GI/GI+GS	Variations en GI/GI+GS (%) ⁽⁵⁾
SN SC	53,42±0,49	-	12,79±0,89	-	26,82±0,67	-	0,5±0,01	-	0,68±0,01	-
SN SE	54,04±1,69	-	12,09±0,2	-	23,74±0,14	-	0,44±0,01	-	0,66±0,004	-
CNP SC 34%	51,83±0,34	-2,98	14,39±0,34	12,51	25,4±0,03	-5,29	0,49±0,003	-2	0,64±0,005	-5,88
CNP SC 36%	48,72±0,15	-8,8	14,71±0,16	15,01	24,34±0,03	-9,25	0,5±0,002	0	0,62±0,002	-8,82
CNP SC 38%	45,05±2,34	-15,67	16,7±0,43	30,57	22,53±0,49	-15,99	0,5±0,03	0	0,57±0,007	-16,18
CNP SE 34%	52,95±0,48	-2,02	15,79±0,34	30,60	20,13±0,32	-15,21	0,38±0,01	-13,64	0,56±0,003	-15,15
CNP SE 36%	52,46±1,66	-2,92	16,2±0,47	33,99	19,78±0,02	-16,68	0,38±0,01	-13,64	0,55±0,007	-16,67
CNP SE 38%	45,63±0,13	-15,56	17,27±0,13	42,85	18,45±0,04	-22,28	0,4±0,001	-9,09	0,52±0,001	-21,21
CNP SC 0°C	45,26±0,16	-15,28	17,52±0,33	36,98	22,03±0,1	-17,86	0,47±0,003	-6	0,56±0,004	-17,65
CNP SC 22°C	45,05±2,34	-15,67	16,7±0,43	30,57	22,53±0,49	-15,99	0,5±0,03	0	0,57±0,007	-16,18
CNP SC 40°C	43,22±0,1	-19,09	14,22±0,92	11,18	25,37±0,26	-5,41	0,59±0,007	18	0,64±0,01	-5,88
CNP SE 0°C	45,83±0,43	-15,19	17,95±0,53	48,47	18,64±0,07	-21,48	0,41±0,005	-6,82	0,51±0,007	-22,73
CNP SE 22°C	45,63±0,13	-15,56	17,27±0,13	42,85	18,45±0,04	-22,28	0,41±0,002	-6,82	0,52±0,001	-21,21
CNP SE 40°C	41,7±1,01	-22,83	16,31±0,51	34,9	19,13±0,12	-19,42	0,46±0,009	4,55	0,54±0,006	-18,18

⁽¹⁾ Pourcentages des variations en teneurs des PM après l'hydratation/roulage du couscous

⁽²⁾ Pourcentages des variations en teneurs des GS après l'hydratation/roulage du couscous

⁽³⁾ Pourcentages des variations en teneurs des GI après l'hydratation/roulage du couscous

⁽⁴⁾ Pourcentages des variations en ratio GI/PM après l'hydratation/roulage du couscous

⁽⁵⁾ Pourcentages des variations en ratio GI/GS+GI après l'hydratation/roulage du couscous

Les teneurs en GI des CNP (tableau 16) varient entre 22,03% PT et 25,4% PT pour la semoule courante et entre 18,45% PT et 20,13% PT pour la semoule extra. Les valeurs des GI des CNP sont inférieures à ceux des semoules dont ils sont issus. Les pourcentages des pertes en GI sont compris entre 5,29% et 17,86% pour la semoule courante et entre 15,21% et 22,28% pour la semoule extra (tableau 18). Donc, les teneurs des GI ont diminué lors de l'hydratation de la semoule et le roulage du couscous. Des résultats similaires ont été obtenus par plusieurs chercheurs lors du mélange semoule/eau (Icard-Verniere et Feillet, 1999; Kratzer, 2007; Jazaeri *et al.*, 2015; Joubert *et al.*, 2018) et le pétrissage de la pâte à pain (Weegels *et al.*, 1996b; Don *et al.*, 2003; Don *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2016).

Ces résultats montrent que l'hydratation et le roulage des semoules provoquent une solubilisation des protéines insolubles au profit des gluténines solubles.

L'augmentation de la gluténine soluble est le résultat de la désagrégation des grands polymères protéiques (Tsen, 1967). Les étapes de la fabrication des pâtes influent sur la solubilité des polymères de la gluténine dans le SDS (Joubert *et al.*, 2018). Le pétrissage des pâtes alimentaires entraîne une diminution des gluténines insolubles (Icard-Verniere et Feillet, 1999; Kratzer, 2007; Joubert *et al.*, 2018). Ce changement, associé à une augmentation des protéines solubles dans le SDS, a été attribué à la dissociation et à la dépolymérisation des grands polymères des gluténines (les insolubles dans le SDS) (Aussenac *et al.*, 2001). Le mélange de la semoule sèche dans les agglomérats humides entraîne une augmentation de la teneur en protéines solubles dans le SDS, en particulier au profit des polymères des gluténines (F1+F2) (Icard-Verniere et Feillet, 1999; Kratzer, 2007; Bruneel *et al.*, 2016; Joubert *et al.*, 2018).

Plusieurs chercheurs ont constaté que la quantité des polymères des gluténines insolubles diminue pendant le pétrissage et augmente au cours du repos de la pâte, bien que la nature des polymères soit différente avant après le malaxage (Mecham *et al.*, 1962; Tsen, 1967; Tanaka et Bushuk, 1973; Weegels *et al.*, 1996b; Skerritt *et al.*, 1999a; Wang *et al.*, 2016; Joubert *et al.*, 2018). Différents mécanismes ont été proposés pour expliquer ces observations. Il a été suggéré que, lors du pétrissage des pâtes, la taille des agrégats protéiques diminue par la rupture des liaisons non covalentes (Tsen, 1967) ou covalentes (Tanaka et Bushuk, 1973; MacRitchie, 1975; Wang *et al.*, 2007). Pour Weegels *et al.* (1997), cette diminution est due à une dépolymérisation des polymères des gluténines à haut poids moléculaire.

Selon Wang *et al.* (2016), la teneur en gluténines solubles des farines après pétrissage augmente considérablement par rapport à celles de la farine native, en raison de l'augmentation de la mobilité des protéines et des changements de conformation par l'hydratation.

La modification de solubilité des protéines provient des changements de conformation des molécules protéiques et des différentes interactions impliquées : liaisons hydrogène, liaisons hydrophobes, liaisons ioniques et/ou liaisons covalentes disulfures (Feillet *et al.*, 1977). Deux types de réaction sont essentiels dans la formation du réseau de gluten, bien que d'autres types de réaction soient également présents. L'une est l'oxydation, dans laquelle les groupes sulfhydryl (SH) libres sont oxydés dans des liaisons disulfures (SS), ce qui conduit à la formation d'agrégats de grandes protéines (Bruneel *et al.*, 2011). L'autre est l'échange de sulfhydryl-disulfure (SH-SS), dans lequel la gliadine se lie à la gluténine, qui implique le clivage ou la réformation des liaisons SS. Cela conduit à la dépolymérisation et au réarrangement des polymères des gluténines (Lagrain *et al.*, 2008).

Il est connu que la quantité d'eau nécessaire pour le roulage du couscous est inférieure à celle utilisée pour la fabrication des pâtes alimentaire et encore plus des pâtes à pain. En plus cette étape nécessite une énergie plus importante pour le développement des pâtes alimentaire et du pain. Néanmoins, dans nos conditions expérimentales et même à un taux d'hydratation faible (34%), l'hydratation des semoules a provoqué une diminution des GI et une augmentation des GS. Icard-Verniere et Feillet (1999) ont observé, dans une étude sur les modifications biochimiques qui se produisent lors de la fabrication des pâtes alimentaires, que l'addition d'eau à la semoule induit certains changements dans les propriétés des protéines du mélange (semoule/eau). La quantité de protéines solubles dans l'acide augmente après hydratation. Simultanément, les protéines insolubles diminuent et les agrégats protéiques (F1+F2) augmentent légèrement. Ils ont aussi souligné que certaines modifications se produisent avant la formation de la pâte au temps (t 0min).

L'analyse de la variance (tableau 18) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de l'hydratation/roulage du couscous sur les teneurs en GS des CNP et un effet hautement significatif sur les teneurs en GI des CNP.

L'analyse des résultats des teneurs en GS des CNP en fonction du taux d'hydratation (tableau 16) montre que les teneurs en GS augmentent avec l'accroissement du taux d'hydratation et suggère une augmentation de la solubilité des gluténines pendant le roulage.

De plus, l'analyse des pourcentages des GI en fonction du taux d'hydratation montre que les GI diminuent au fur et à mesure que le taux d'hydratation augmente. Ces résultats sont en contradiction avec ceux trouvés par Icard-Verniere et Feillet (1999) qui ont constaté que l'augmentation du taux d'hydratation n'influence pas la teneur en GI. Ces résultats peuvent être expliqués par les interactions produites entre les molécules des protéines et les molécules d'eau lors de l'hydratation. En effet, les structures initiales du gluten de blé peuvent se réorganiser au cours de l'hydratation au détriment d'interaction avec les molécules d'eau (Roman-Gutierrez *et al.*, 2002). Pendant l'hydratation, les liaisons hydrogène de la glutamine-glutamine se cassent et des liaisons hydrogène de glutamine-eau se forment (Grant *et al.*, 1999). Selon le modèle «boucle et train» (Belton, 1999), la structure du gluten est principalement stabilisée par des liaisons hydrogène. À l'état sec, ces liaisons se forment principalement entre les différentes chaînes de protéines. Lors de l'hydratation, les interactions protéines-protéines (trains) sont peu à peu remplacées par des interactions protéines-eau, ce qui provoque une désagrégation locale des chaînes appelées «boucles». Lorsque le gluten est étiré, les boucles se déforment et les trains se séparent (Belton, 1999). Dans ces conditions, on suppose que plus le taux d'hydratation augmente plus les interactions protéines-protéines sont remplacées par des interactions protéines-eau, ainsi la dépolymérisation des polymères des gluténines est plus élevée se traduisant par une diminution des GI et une augmentation des GS.

L'analyse de la variance (tableau 18) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur les teneurs en GI et en GS des CNP.

L'analyse des résultats des GS et des GI des CNP en fonction de la température de l'eau d'hydratation (tableau 16) montre que les GS diminuent avec l'augmentation de la température de l'eau d'hydratation et les GI augmentent. Ceci suggère que les fractions solubles sont moins extractibles quand la température augmente de 0 à 40°C. Cette diminution revient peut être à l'augmentation des interactions entre les protéines et plus spécialement aux interactions hydrophobes. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Icard-Verniere et Feillet (1999) qui ont noté l'effet de la température sur la teneur en -SH libre. La teneur en SH libre diminue lorsque la température augmente de 10 à 40°C. L'extraction des protéines soluble dans l'acide est moins prononcée, mais toujours positivement corrélée à la température. La fraction insoluble est presque constante à 10°C et à 20°C, mais elle a considérablement augmenté à 40°C. Simultanément, F1 augmente et F2 diminue. Ces auteurs supposent que lorsque la température de l'eau d'hydratation augmente de 20°C et 40°C, les

LMWG sont partiellement associées, probablement par des interactions hydrophobes pour former des agrégats plus importants et sont incluses dans la fraction HMWG. D'après ces auteurs, le paramètre le plus important qui contrôle la composition protéique est la température.

De même, Lefebvre *et al.* (2000) et Tsiami *et al.* (1997) ont observé une augmentation dans le module de cisaillement du gluten au dessus d'une température de 40°C. Cette augmentation est liée à la formation de liaisons disulfures interchaînes (Lefebvre *et al.*, 2000).

L'analyse de la variance (tableau 18) fait ressortir un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la température de l'eau d'hydratation sur les teneurs en GI et en GS des CNP.

Les résultats des ratios GI/PM des CNP varient de 0,47 à 0,59 pour la semoule courante et de 0,38 à 0,46 pour la semoule extra. La comparaison des valeurs des ratios GI/PM des CNP avec les valeurs des ratios GI/PM de leurs semoules respectives montre que mise à part les ratios des couscous roulés avec l'eau à 40°C qui augmentent, les ratios des couscous issus des différents taux d'hydratation et ceux hydratés avec de l'eau à 0°C et 22°C diminuent après l'hydratation/roulage du couscous. De plus, les pertes sont moins élevées pour les couscous issus de la semoule courante que pour ceux fabriqués avec la semoule extra. Les pourcentages des pertes varient de 0% à 6% pour la semoule courante et de 6,81% à 13,63% pour la semoule extra (tableau 16).

L'analyse de la variance (tableau 18) met en évidence un effet non significatif du traitement de l'hydratation et du roulage du couscous sur le ratio GI/PM des CNP.

Tableau 17 : Analyse de la variance des fractions protéiques des semoules

	PM (%)	GS (%)	GI (%)	GI/PM	GI/GI+GS
Moyenne	53,73	12,44	25,28	0,47	0,67
Maximum	55,11	11,86	27,49	0,51	0,69
Minimum	52,09	13,82	23,6	0,43	0,66
Ecart type	1,16	0,69	1,74	0,04	0,01
Coefficient de variation	2,17	5,57	6,88	7,69	1,62
Effet de la semoule	NS	NS	**	**	NS

*: Significatif à $p < 0,05$

**: Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : Très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

Tableau 18 : Analyse de la variance des fractions protéiques des couscous non précuits

	PM (%)	GS (%)	GI (%)	GI/PM	GI/GI+GS
Moyenne	47,27	16,1	21,58	0,46	0,57
Maximum	54,1	18,39	25,60	0,59	0,65
Minimum	40,85	13,3	18,42	0,37	0,5
Ecart type	3,94	1,33	2,65	0,06	0,05
Coefficient de variation	8,34	8,28	12,26	14,09	8,15
Effet du taux d'hydratation	***	***	***	NS	***
Effet de la température	***	***	***	***	***
Effet de l'hydratation et du roulage	***	***	**	NS	***

*: Significatif à $p < 0,05$

**: Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : Très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

Par ailleurs, les valeurs des rapports GI/GI+GS des CNP sont comprises entre 0,56 et 0,64 pour la semoule courante et entre 0,51 et 0,56 pour la semoule extra. La comparaison des valeurs des ratios GI/GI+GS des CNP avec les valeurs des ratios des semoules dont ils sont issus montre que les ratios GI/GI+GS diminuent avec l'hydratation et le roulage du couscous. Les pourcentages des pertes varient de 5,88% à 17,65% pour la semoule courante et de 15,15% à 22,72% pour la semoule extra (tableau 16).

L'analyse de la variance (tableau 18) montre un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de l'hydratation/roulage du couscous sur le rapport GI/GI+GS des CNP.

L'évolution des ratios GI/PM et GI/GI+GS des CNP en fonction du taux d'hydratation (tableau 16) montre une légère augmentation du GI/PM et une diminution de GI/GI+GS avec l'accroissement du taux d'hydratation.

L'analyse de la variance (tableau 18) fait apparaître un effet non significatif du taux d'hydratation sur le ratio GI/PM des CNP et un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur le rapport GI/GI+GS des CNP.

Par contre, l'évolution des rapports GI/PM et GI/GI+GS des CNP en fonction de la température de l'eau d'hydratation (tableau 16) montre une augmentation de ces deux paramètres avec l'accroissement de la température de l'eau d'hydratation (0°C à 40°C).

L'analyse de la variance (tableau 18) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la température de l'eau d'hydratation sur les ratios GI/PM et GI/GI+GS des CNP.

4-1-2- Modifications des fractions protéiques après la précuisson et le séchage des couscous

Les teneurs en protéines des différentes fractions: PM, GS et GI et les valeurs des ratios : GI/PM et GI/GS+GI des échantillons de couscous après la précuisson et après le séchage sont regroupées dans le tableau 19 et le tableau 20 respectivement.

Après la précuisson les teneurs des PM des couscous sont comprises entre 19,35% PT et 22,85% PT pour la semoule courante et entre 21,29% PT et 25% PT pour la semoule extra, les valeurs des GS des CP varient de 3,2% PT à 4,32% PT pour la semoule courante et de 2,06% PT à 3,15% PT pour la semoule extra alors que les teneurs en GI des CP varient entre 33,64%PT et 39,04% PT pour la semoule courante et entre 35,11% PT et 41,49% PT pour la semoule extra (tableau 19).

La comparaison des teneurs des différentes fractions protéiques des CP avec ceux des CNP (tableaux 16 et 19) montre que les teneurs des PM et des GS diminuent considérablement après la précuisson des couscous tandis que les teneurs des GI augmentent amplement. Ces modifications dans la solubilité des protéines sont provoquées par la polymérisation, la réticulation et la dénaturation des protéines sous l'effet du traitement hydrothermique. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Weegels *et al.* (1994), qui ont trouvé que l'extractibilité des protéines dans le SDS diminue de 32% par rapport aux valeurs du gluten non chauffé. De même, Wang *et al.* (2016) ont signalé que l'extractibilité des

protéines du gluten diminue de manière significative lors de la cuisson à la vapeur. Selon Guezlane *et al.* (1998), le traitement hydrothermique provoque une forte diminution de la surface totale du chromatogramme et entraîne la quasi disparition des deux premières fractions F1 et F2 constituées des agrégats gluténines HMWG et LMWG, sous-unités les plus agrégatives. L'insolubilisation maximale des protéines intervient entre 4 et 8min de traitement hydrothermique.

Il est connu que les traitements thermiques provoquent l'agrégation des protéines de gluten en raison des réactions d'échange des liaisons disulfures (Schofield *et al.*, 1983; Domenek *et al.*, 2002; Abecassis *et al.*, 2012). Certains auteurs ont étudié le comportement des protéines de gluten soumises à des températures relativement élevées (Deng *et al.*, 2008). Les traitements à la vapeur induisent la réticulation du réseau protéique qui est accrue avec la température et la durée du traitement (Wagner, 2010). Le pourcentage des gluténines insolubles augmente avec l'intensité du traitement thermique de (Domenek *et al.*, 2004) et l'élévation de cette fraction est due à l'agrégation des protéines qui est provoquée par la formation de liaisons disulfures entre différents polypeptides du gluten (Schofield *et al.*, 1983; Guezlane, 1993; Weegels *et al.*, 1996a; Weegels *et al.*, 1996b; Shewry et Tatham, 1997; Shewry *et al.*, 2000)

Le traitement thermique des protéines du gluten de blé entraîne une réticulation disulfure à travers des réactions d'échange SH-SS et l'oxydation de SH libre, conduisant à la formation de grands agrégats de protéines (Wang *et al.*, 2016) et à des changements rhéologiques et fonctionnels (Lagrain *et al.*, 2005).

Les protéines, sont fortement affectées par les traitements hydrothermiques (Kasarda *et al.*, 1976). L'une des premières conséquences de ces traitements sur les protéines est la dénaturation de la structure native par modification des interactions faibles (hydrogène, hydrophobes et ioniques) et covalentes (Guezlane, 1993). Ces traitements ont pour effet de provoquer la formation d'agrégats protéiques par la formation, entre les chaînes polypeptidiques, d'interactions non covalentes hydrophobes (Kasarda *et al.*, 1976) et de liaisons covalentes (Jeanjean *et al.*, 1980; Weegels *et al.*, 1994).

L'analyse des teneurs en PM et en GS après la précuisson fait apparaître une diminution des teneurs en GS plus importante que celle des PM. En effet, les pourcentages des pertes des PM varient entre 47,13% et 57,05% pour la semoule courante et entre 43,5% 53,34% pour la semoule extra, alors que, les pourcentages des pertes des GS sont compris entre 69,62% et

81,74% pour la semoule courante et 80,37% et 88,52% pour la semoule extra (tableau 19). Ceci montre que les gluténines sont plus sensibles aux traitements hydrothermiques que les protéines monomériques. Ces résultats sont tout à fait en accord avec ceux obtenus par (Booth *et al.*, 1980; Schofield *et al.*, 1983; Schofield *et al.*, 1984; Ait Mouh, 1989; Guezlane, 1993; Guezlane *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2016)

Guezlane *et al.* (1998) ont observé une stabilité thermique du groupe des ω -gliadines qui a été signalée précédemment par plusieurs auteurs (Autran et Berrier, 1984; Kobrehel et Abecassis, 1985; Ait Mouh, 1989). Cette résistance des ω -gliadines à la chaleur est due à leur manque de cystéine et à leur structure fortement stabilisée par des interactions hydrophobes (Charbonnier, 1974; Tatham et Shewry, 1985; Guezlane *et al.*, 1998). Par contre, les autres gliadines sont thermo-coagulables. Une disparition progressive de protéines hydrosolubles, ainsi que des α , β , δ gliadines, est observée au fur et à mesure que le traitement augmente (Guezlane *et al.*, 1998). Ces auteurs ont suggéré d'utiliser le rapport ω -gliadines/gliadines thermo-coagulables comme marqueur de l'intensité du traitement thermique subi par le couscous pendant la précuisson.

Après la cuisson à la vapeur, la polymérisation de la gluténine a été attribuée à l'interaction des gliadines de type α/β avec la gluténine, à l'exception des ω -gliadines qui n'ont pas de résidus de cystéine (Deng *et al.*, 2008). Wang *et al.* (2016) ont noté que, lors de la cuisson à la vapeur, une grande quantité des gliadines est incorporée dans les gluténines à travers le mécanisme d'échange SH-SS. La gluténine, plus sensible au chauffage, se polymérise en premier en oxydant le SH libre en SS, ce qui se produit parallèlement à l'incorporation fractionnée de la gliadine.

Guezlane (1993) a montré que la dénaturation hydrothermique des protéines crée une structure rigide et retarde la gélatinisation de l'amidon en limitant le gonflement de l'amidon. De même, Wang *et al.* (2016) ont noté que la polymérisation du gluten survient principalement pendant la cuisson à la vapeur, et le réseau de protéines est plus susceptible de restreindre le gonflement de l'amidon.

Tableau 19 : Teneurs des fractions protéiques des couscous précuits (CP)

	PM (% PT)	Variations en PM (%) ⁽¹⁾	GS (% PT)	Variations en GS (%) ⁽²⁾	GI (% PT)	Variations en GI (%) ⁽³⁾	GI/PM	Variations en GI/PM (%) ⁽⁴⁾	GI/GI+GS	Variations en GI/GI+GS (%) ⁽⁵⁾
CP SC 34%	22,37±0,25	-56,84	4,16±0,16	-71,09	33,64±0,07	32,44	1,5±0,02	206,12	0,89±0,003	39,06
CP SC 36%	21,74±0,48	-55,38	3,76±0,61	-74,44	35,66±0,71	46,51	1,64±0,07	228	0,9±0,01	45,16
CP SC 38%	19,35±0,35	-57,05	3,49±0,24	-79,1	37,96±0,28	68,49	1,96±0,02	292	0,92±0,006	61,4
CP SE 34%	25±0,98	-52,79	3,1±0,35	-80,37	36,95±0,09	83,56	1,48±0,06	289,47	0,92±0,008	64,28
CP SE 36%	24,77±0,63	-52,78	2,68±0,36	-83,46	38,34±0,4	93,83	1,55±0,06	307,89	0,93±0,008	69,09
CP SE 38%	21,29±0,53	-53,34	2,16±0,39	-87,49	38,84±0,2	110,51	1,82±0,05	355	0,95±0,01	82,69
CP SC 0°C	20,14±0,09	-55,5	3,2±0,48	-81,74	39,04±0,29	77,21	1,94±0,01	312,76	0,92±0,01	64,28
CP SC 22°C	19,35±0,35	-57,05	3,49±0,24	-79,1	37,96±0,28	68,49	1,96±0,02	292	0,92±0,006	61,4
CP SC 40°C	22,85±0,15	-47,13	4,32±0,22	-69,62	37,36±0,07	47,26	1,64±0,007	177,97	0,9±0,005	40,62
CP SE 0°C	22,36±1,93	-51,21	2,06±0,03	-88,52	41,49±0,07	122,58	1,86±0,17	353,66	0,95±0,001	86,27
CP SE 22°C	21,29±0,53	-53,34	2,16±0,39	-87,49	38,84±0,2	110,51	1,82±0,05	343,9	0,95±0,01	82,69
CP SE 40°C	23,56±1,65	-43,5	3,15±0,23	-80,69	35,11±0,06	83,53	1,49±0,11	223,91	0,92±0,006	70,37

⁽¹⁾ Pourcentages des variations en teneurs des PM après la précuisson du couscous

⁽²⁾ Pourcentages des variations en teneurs des GS après la précuisson du couscous

⁽³⁾ Pourcentages des variations en teneurs des GI après la précuisson du couscous

⁽⁴⁾ Pourcentages des variations en ratio GI/PM après la précuisson du couscous

⁽⁵⁾ Pourcentages des variations en ratio GI/GS+GI après la précuisson du couscous

L'analyse de la variance (tableau 21) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la précuisson sur les teneurs des différentes fractions protéiques (PM, GS et GI) des CP.

Les résultats des rapports GI/PM des CP varient de 1,5 à 1,96 pour la semoule courante et de 1,48 à 1,86 pour la semoule extra. La comparaison des valeurs des ratios GI/PM des CP avec ceux des CNP (tableaux 16 et 19) montre une augmentation considérable des valeurs du rapport GI/PM après la précuisson du couscous. Les pourcentages d'augmentation des ratios GI/PM varient de 177,97% à 312,76% pour la semoule courante et de 223,91% à 355% pour la semoule extra (tableau 19).

De même, les valeurs des rapports GI/GI+GS des CP sont comprises entre 0,89 et 0,92 pour la semoule courante et entre 0,92 et 0,95 pour la semoule extra. La comparaison des valeurs des ratios GI/GI+GS des CP avec ceux des CNP (tableaux 16 et 19) montre que les ratios GI/GI+GS augmentent avec la précuisson du couscous. Les pourcentages d'augmentation des ratios GI/GI+GS varient de 39,06% à 64,28% pour la semoule courante et de 64,28% à 86,27% pour la semoule extra (tableau 19).

L'analyse de la variance (tableau 21) montre un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la précuisson sur les ratios GI/PM et GI/GI+GS des CP.

Après le séchage, les teneurs des PM des couscous sont comprises entre 14,33% PT et 22,87% PT pour la semoule courante et entre 20,33% PT et 23,76% PT pour la semoule extra, les valeurs des GS des couscous varient de 1,84% PT à 3,33% PT pour la semoule courante et de 1,86% PT à 2,4% PT pour la semoule extra alors que les teneurs en GI des couscous varient entre 32,96% PT et 37,89% PT pour la semoule courante et entre 34,48% PT et 39,13% PT pour la semoule extra (tableau 20).

La comparaison des teneurs des différentes fractions protéiques des CS avec ceux des CP (tableaux 19 et 20) fait ressortir que les teneurs des PM, des GS et des GI diminuent après séchage. Le séchage des couscous étudiés est réalisé à la température ambiante et son influence sur les modifications biochimiques des protéines du blé n'a jamais été étudiée. De ce fait, et pour comparer nos résultats, nous avons utilisé ceux obtenus à partir des travaux concernant l'influence du séchage à basse température sur les modifications biochimiques des protéines du blé. D'après Lamacchia *et al.* (2007) et Petitot *et al.* (2009), une diminution significative de la protéine totale soluble dans le SDS (F1 à F5) a été observée après séchage

des pâtes à 55°C (17h). Les résultats obtenus par ces auteurs ont montré que les polymères des gluténines solubles dans le SDS (F1 et F2) mais aussi la gliadine (F4) ont été impactés révélant que le séchage à 55°C était susceptible de les réticuler ensemble dans des agrégats de protéines insolubles dans le SDS.

L'analyse de la variance (tableau 22) fait ressortir un effet significatif ($p < 0,05$) du séchage sur les teneurs des PM des CS, un effet hautement significatif ($p < 0,01$) du séchage sur les teneurs en GI des CS et un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du séchage sur les teneurs des GS des CS.

Les résultats des rapports GI/PM des CS varient de 1,56 à 2,52 pour la semoule courante et de 1,54 à 1,85 pour la semoule extra. La comparaison des valeurs des ratios GI/PM des CS avec ceux des CP (tableaux 19 et 20) montre que, mise à part les ratios GI/PM des échantillons de couscous roulés avec l'eau d'hydratation T0°C issus des deux semoules et le couscous roulé avec la semoule extra et hydraté avec de l'eau T40°C, tous les ratios GI/PM des autres échantillons augmentent après le séchage du couscous.

En revanche, les valeurs des rapports GI/GI+GS des CS sont comprises entre 0,91 et 0,95 pour la semoule courante et entre 0,94 et 0,97 pour la semoule extra. La comparaison des valeurs des ratios GI/GI+GS des CS avec ceux des CP (tableaux 19 et 20) montre que les ratios GI/GI+GS augmentent avec le séchage du couscous.

L'analyse de la variance (tableau 22) montre un effet non significatif du séchage sur les ratios GI/PM des CS et un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du séchage sur les rapports GI/GI+GS des CS.

L'évolution des teneurs des différentes fractions protéiques des couscous après la précuisson et le séchage en fonction du taux d'hydratation (tableaux 19 et 20) montre que lorsque le taux d'hydratation augmente les teneurs des PM et des GS diminuent alors que ceux des GI augmentent. L'analyse de ces résultats montre que la solubilité des protéines après la précuisson et le séchage est plus faible quand les couscous sont roulés avec des taux d'hydratation croissants. Cette diminution de la solubilité est due à l'effet du traitement thermique sur les protéines durant la précuisson. Selon Weegels *et al.* (1994), l'effet du chauffage sur l'extractible des protéines du gluten chauffées dépend de la teneur en humidité de l'échantillon de gluten.

L'analyse des résultats des fractions protéiques des couscous après la précuisson et le séchage en fonction de la température de l'eau d'hydratation (tableaux 19 et 20) montre que les teneurs des PM diminuent lorsque la température de l'eau passe de 0°C à 22°C et augmentent à 40°C. Par contre, pour les protéines polymériques, les teneurs des GS augmentent avec la température de 0°C à 40°C et les teneurs des GI sont inversement proportionnelles à la température.

L'analyse de la variance (tableau 21) fait apparaître un effet hautement significatif ($p < 0,01$) du taux d'hydratation sur les teneurs en GS des CP et un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation sur les teneurs des PM et des GI des CP. En revanche, on note un effet hautement significatif ($p < 0,01$) de la température de l'eau d'hydratation sur les teneurs en PM des CP et un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de la température de l'eau d'hydratation sur les teneurs en GS et en GI des CP.

L'analyse de la variance (tableau 22) met en évidence un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation sur les teneurs des différentes fractions protéiques (PM, GS et GI) des CS.

L'évolution des rapports GI/PM et GI/GI+GS des CP et des CS en fonction du taux d'hydratation (tableaux 19 et 20) montre une augmentation du GI/PM et du GI/GI+GS avec l'accroissement du taux d'hydratation.

Par contre, l'évolution des rapports GI/PM des CP en fonction de la température de l'eau d'hydratation (tableau 19) montre que les ratios des couscous hydratés avec de l'eau à la température T0°C et T22°C sont comparables tandis que pour les couscous roulés avec de l'eau à la température T40°C les ratios GI/PM diminuent. Néanmoins, l'évolution des valeurs des rapports GI/PM des CS en fonction de la température de l'eau d'hydratation (tableau 20) montre des maxima pour les couscous roulés avec de l'eau à la température T22°C et elles diminuent pour les couscous hydratés avec de l'eau à la température T0°C et T40°C.

L'évolution des ratios GI/GI+GS des couscous précuits et des couscous secs en fonction de la température de l'eau de roulage (tableaux 19 et 20) montre que les valeurs des ratios GI/GI+GS des CP et des couscous secs diminuent avec l'augmentation de la température de l'eau de roulage.

Tableau 20 : Teneurs des fractions protéiques des couscous secs (CS)

	PM (% PT)	Variations en PM (%) ⁽¹⁾	GS (% PT)	variations en GS (%) ⁽²⁾	GI (% PT)	Variations en GI (%) ⁽³⁾	GI/PM	Variations en GI/PM (%) ⁽⁴⁾	GI/GI+GS	Variations en GI/GI+GS (%) ⁽⁵⁾
CS SC 34%	21,09±0,16	-5,72	3,19±0,3	-23,32	32,96±0,56	-2,02	1,56±0,03	4	0,91±0,007	2,25
CS SC 36%	18,46±0,12	-15,09	2,66±0,23	-29,26	34,04±0,03	-4,54	1,84±0,01	12,19	0,93±0,006	3,33
CS SC 38%	14,33±0,34	-25,94	2,17±0,27	-37,82	36,13±0,05	-4,82	2,52±0,06	28,57	0,94±0,007	2,17
CS SE 34%	23,76±0,82	-4,96	2,4±0,24	-22,58	36,48±0,12	-1,27	1,54±0,05	4,05	0,94±0,007	2,17
CS SE 36%	22,73±0,77	-8,24	1,93±0,28	-27,98	37,24±0,06	-2,87	1,64±0,06	5,81	0,95±0,008	2,15
CS SE 38 %	20,33±0,05	-4,51	1,86±0,28	-13,89	37,59±0,07	-3,22	1,85±0,01	1,65	0,95±0,007	0
CS SC 0°C	22,87±0,2	13,56	1,84±0,16	-42,5	37,89±0,2	-2,95	1,66±0,02	-14,43	0,95±0,004	3,26
CS SC 22°C	14,33±0,34	-25,94	2,17±0,27	-37,82	36,13±0,05	-4,82	2,52±0,06	28,57	0,94±0,007	2,17
CS SC 40°C	22,33±0,14	-2,28	3,33±0,1	-22,92	34,72±0,06	-7,07	1,55±0,007	-5,49	0,91±0,002	1,11
CS SE 0°C	22,4±0,82	0,18	1,34±0,17	-34,95	39,13±0,17	-5,69	1,75±0,07	-5,91	0,97±0,003	2,11
CS SE 22°C	20,33±0,05	-4,51	1,86±0,28	-13,89	37,59±0,07	-3,22	1,85±0,01	1,65	0,95±0,007	0
CS SE 40°C	21,24±0,71	-9,85	1,93±0,08	-38,73	34,48±0,95	-1,79	1,63±0,1	9,39	0,95±0,002	3,26

⁽¹⁾ Pourcentages des variations en teneurs des PM après le séchage du couscous

⁽²⁾ Pourcentages des variations en teneurs des GS après le séchage du couscous

⁽³⁾ Pourcentages des variations en teneurs des GI après le séchage du couscous

⁽⁴⁾ Pourcentages des variations en ratio GI/PM après le séchage du couscous

⁽⁵⁾ Pourcentages des variations en ratio GI/GS+GI après le séchage du couscous

L'analyse de la variance (tableaux 21 et 22) fait ressortir un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation sur les rapports GI/PM et GI/GI+GS des CP et des CS.

Tableau 21 : Analyse de la variance des fractions protéiques des couscous précuits

	PM (%)	GS (%)	GI (%)	GI/PM	GI/GI+GS
Moyenne	22,34	3,21	37,44	1,69	0,92
Maximum	25,74	4,51	41,52	2,06	0,96
Minimum	19,11	1,71	33,59	1,39	0,89
Ecart type	1,92	0,79	2,18	0,19	0,02
Coefficient de variation	8,59	24,6	5,82	11,47	2,26
Effet du taux d'hydratation	***	**	***	***	***
Effet de la température	**	***	***	***	***
Effet de la précuisson	***	***	***	***	***

*: Significatif à $p < 0,05$

** : Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : Très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

Tableau 22 : Analyse de la variance des fractions protéiques des couscous secs

	PM (%)	GS (%)	GI (%)	GI/PM	GI/GI+GS
Moyenne	20,95	2,27	36,06	1,75	0,94
Maximum	24,67	3,54	39,32	2,58	0,97
Minimum	14	1,17	32,33	1,48	0,90
Ecart type	2,71	0,64	1,92	0,29	0,02
Coefficient de variation	12,94	28,11	5,31	16,27	1,92
Effet du taux d'hydratation	***	***	***	***	***
Effet de la température	***	***	***	***	***
Effet du séchage	*	***	**	NS	***

*: Significatif à $p < 0,05$

** : Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : Très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

4-1-3- Relations entre les fractions protéiques et la qualité du couscous

Dans le cas de la fabrication des couscous, le rôle des différentes fractions protéiques dans la qualité des couscous est encore mal connu. En particulier, les modifications que subissent ces fractions pendant les différentes étapes de la fabrication du couscous (mélange, précuisson et séchage) qui n'ont jamais été examinées malgré le rôle primordial que joue ces fractions protéiques dans la qualité culinaire et technologique des produits céréaliers.

La plupart des auteurs suggèrent que les propriétés physiques de la pâte, en particulier celles associées à la force de la pâte et aux propriétés de cuisson, sont déterminées principalement par des propriétés qualitatives et quantitatives des gluténines (Wang et Kovacs, 2002b). Des corrélations significatives entre les GMP dans la farine et les paramètres de qualité, tels que les propriétés physiques de la pâte, ont été observées (Dachkevitch et Autran, 1989; Singh *et al.*, 1990; Gupta *et al.*, 1992; Gupta *et al.*, 1993; Weegels *et al.*, 1996b). Les gluténines insolubles semblent également être en corrélation avec la qualité culinaire (Dexter et Matsuo, 1980; Kurowska et Bushuk, 1988; Gupta *et al.*, 1993; Jia *et al.*, 1996).

En outre, plusieurs auteurs ont montré que la quantité de polymère insoluble est directement liée aux paramètres technologiques de la pâte (Skerritt *et al.*, 1999a; Skerritt *et al.*, 1999b) en particulier ceux liés au pétrissage (Gupta *et al.*, 1992). En effet, la teneur en gluténines insolubles de la semoule a été associée à la force du pétrissage des pâtes alimentaires (Sissons *et al.*, 2005; Edwards *et al.*, 2007). La qualité rhéologique finale des pâtes alimentaires cuites est liée aux polymères des glutenines insolubles (Suchy *et al.*, 2003; Joubert *et al.*, 2018) et inversement liées à la proportion de protéines riches en monomère (Suchy *et al.*, 2003).

4-1-3-1- Relations entre les fractions protéiques et le rendement du roulage

Lors du roulage du couscous la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation de la semoule et le roulage du couscous n'est pas suffisante pour le développement de la pâte mais elle provoque une solubilité des GI. Cette solubilisation des protéines est nécessaire pour la formation des granules de couscous. Selon Hosney *et al.* (1986), après l'hydratation, et avant le développement de la pâte, l'eau diffuse lentement dans les particules de semoule et augmente la mobilité des protéines par un effet plastifiant. D'après Debbouz et Donnelly (1996), une hydratation et une énergie appropriées sont essentielles pour obtenir des produits de bonne qualité avec une structure granulaire sans développement de la pâte. Le processus d'agglomération des poudres alimentaires résulte de la contribution des phénomènes physiques (ponts capillaires) et de la réactivité physico-chimique des molécules, ce qui renforce les forces d'adhésion entre les particules, en apportant une contribution significative des forces visqueuses (Cuq *et al.*, 2013). Lorsque les poudres alimentaires sont hydratées, certaines de leurs molécules sont susceptibles de subir des modifications physico-chimiques irréversibles, telles que la solubilisation. Les molécules ont la capacité d'établir avec les

molécules environnantes des interactions à basse énergie incluant des liaisons hydrogène, hydrophobes ou ioniques. Par exemple, les protéines de blé peuvent établir un réseau macromoléculaire continu lorsqu'elles sont soumises à l'addition et au mélange de l'eau, ce qui contribue à des mécanismes irréversibles (Abecassis *et al.*, 2012). La légère modification de la réactivité des composants protéiques donne lieu à de nouvelles liaisons responsables de l'initiation à la formation de la pâte (Icard-Verniere et Feillet, 1999). Au cours de l'agglomération du couscous, la réactivité élevée de la surface de particules de la semoule de blé génère un gonflement des particules, la solubilisation des composants de blé et la formation éventuelle d'un réseau macromoléculaire par l'intermédiaire d'interactions de protéines (Hébrard *et al.*, 2003)

Le calcul des corrélations (Annexe C) fait ressortir une relation entre les teneurs des GS et GI des CNP et le rendement du roulage. La teneur en GS montre une corrélation significative ($p < 0,05$) positive ($r = 0,68$) avec le rendement en couscous et une corrélation significative ($p < 0,05$) négative ($r = -0,65$) avec le rendement en semoules non agglomérées. En revanche, la teneur en GI présente une corrélation significative ($p < 0,05$) négative ($r = -0,65$) avec le rendement en grumeaux, et une corrélation significative ($p < 0,05$) positive ($r = 0,84$) avec le rendement en semoules non agglomérées. Le rapport GI/GI+GS montre une corrélation négative avec le rendement en couscous ($r = -0,46$) et avec le rendement en grumeaux ($r = -0,48$) et une corrélation significative ($p < 0,05$) positive avec le rendement en semoules non agglomérées ($r = 0,82$).

Une autre relation est observée entre les teneurs en protéines des semoules, les teneurs des différentes fractions protéiques des semoules et le rendement du roulage (Annexe C). Pour la teneur en protéines des semoules, une corrélation significative ($p < 0,05$) positive avec le rendement en grumeaux ($r = 0,69$) et une corrélation significative ($p < 0,05$) négative avec le rendement en semoules non agglomérées ($r = -0,66$) est notée. Concernant, les teneurs en fractions protéiques des semoules les observations suivantes sont relevées : le rendement en grumeaux montre des corrélations significatives ($p < 0,05$) négatives avec la teneur en GI ($r = -0,77$), le rapport GI/PM ($r = -0,75$) et le rapport GI/GI+GS ($r = -0,58$). En revanche, le rendement en semoules non agglomérées présente des corrélations significatives ($p < 0,05$) positives avec les teneurs en GI ($r = 0,73$), le rapport GI/PM ($r = 0,70$) et le rapport GI/GI+GS ($r = 0,51$). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Joubert *et al.* (2018) qui ont noté que les échantillons de semoule avec un pourcentage élevé en protéines polymériques non extractibles (% UPP) et une faible teneur en protéines produisent de petits agglomérats

comparativement aux échantillons à faible pourcentage en protéines polymériques non extractibles (% UPP) et une teneur en protéines élevées. D'après ces auteurs, la teneur en protéines de la semoule est liée à la formation de gros grumeaux ($\emptyset > 2$ mm) ($r=0,83$) au détriment des petits agglomérats ($\emptyset < 0,25$ mm) ($r=-0,96$). Ces résultats suggèrent que la teneur en protéines des semoules et/ou le % UPP pourrait jouer un rôle dans le processus d'agglomération de la semoule hydratées (Joubert *et al.*, 2018). La teneur en protéines élevée de la semoule renforce la structure des agglomérats en favorisant le collage entre les particules de la semoule (Bellocq *et al.*, 2018).

Des différences dans le comportement d'agglomération des semoules ont été observées parmi les échantillons. La viscosité des particules de semoule humide pourrait être liée à leur teneur en protéines, tandis que la formation de morceaux pourrait être en partie ralentie par un pourcentage élevé de niveau de UPP (Joubert *et al.*, 2018).

4-1-3-2- Relations entre les fractions protéiques et la qualité technologique du couscous

Dans cette étude des relations entre les teneurs des fractions protéiques des CS et la qualité technologique des couscous à l'état sec sont observées. En effet, le calcul des corrélations (Annexe C) fait apparaître des corrélations significatives ($p < 0,05$) positives entre la teneur en GI ($r=0,6$), le rapport GI/GI+GS des CS ($r=0,77$) et la D50.

De plus, d'autres relations ont été notées entre les teneurs en fractions protéiques et la qualité culinaire du couscous (Annexe C). La teneur en GI est corrélée positivement et de manière significative ($p < 0,05$) au gonflement à froid et à chaud ($r=0,68$; $r=0,73$) respectivement et négativement et à la délitescence ($r=-0,47$). De même, le ratio GI/GI+GS est corrélé positivement et significativement ($p < 0,05$) au gonflement à chaud et à froid du couscous ($r=0,54$; $r=0,72$) respectivement et négativement et à la délitescence ($r=-0,37$)

En revanche, une corrélation positive est notée entre le GI/GI+GS et l'IPMT ($r=0,4$). D'après Guezlane *et al.* (1998), la prise en masse importante du couscous pourrait ainsi être mise sur le compte de l'hydratation des protéines et de leur aptitude à interagir via des liaisons de type secondaire, notamment hydrophobes.

4-2- Influences des conditions d'hydratation sur le test de gonflement des gluténines (IGG)

Le test de l'indice de gonflement des gluténines (IGG) développé par Wang et Kovacs (2002b) et utilisé pour la sélection du blé tendre a été adapté au blé dur pour prédire les propriétés rhéologiques (Wang et Kovacs, 2002a).

Les résultats du test IGG des semoules et des échantillons de couscous aux différents stades de fabrication (hydratation et roulage, précuisson, séchage) en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation sont illustrés dans la figure 33 et la figure 34 respectivement.

L'analyse des résultats de l'IGG des différents échantillons de couscous en fonction des traitements montre que les IGG CNP sont plus faibles que IGG SEM (figure 33). Ceci est probablement dû à la solubilisation et la dépolymérisation de la fraction GI. Cette solubilisation est provoquée par l'hydratation et le roulage du couscous. En effet, Icard-Verniere et Feillet (1999) ont observé, lors de l'hydratation de la semoule, une diminution de la fraction insoluble des protéines. Wang et Kovacs (2002b) ont signalé que la gluténine perd la capacité de gonflement, lorsqu'une partie de la GI commence à se dissoudre.

De plus, on remarque aussi d'après les figures 33 et 34 que, les valeurs des IGG CP et des IGG CS, sont nettement plus élevées que celles des IGG CNP. Cette augmentation est liée à l'accroissement de la fraction GI suite à la dénaturation des protéines par la précuisson. Selon Guezlane (1993), les traitements hydrothermiques des couscous entraînent une dénaturation des protéines. Les gluténines de haut poids moléculaire (HMWG) et les gluténines de faible poids moléculaire (LMWG) s'agrègent très rapidement dès le début du traitement hydrothermique pour former des agrégats de taille très élevée.

L'analyse de la variance (tableau 23) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) de l'hydratation et du roulage, de la précuisson, et du séchage sur l'indice de gonflement des gluténines des couscous (IGG).

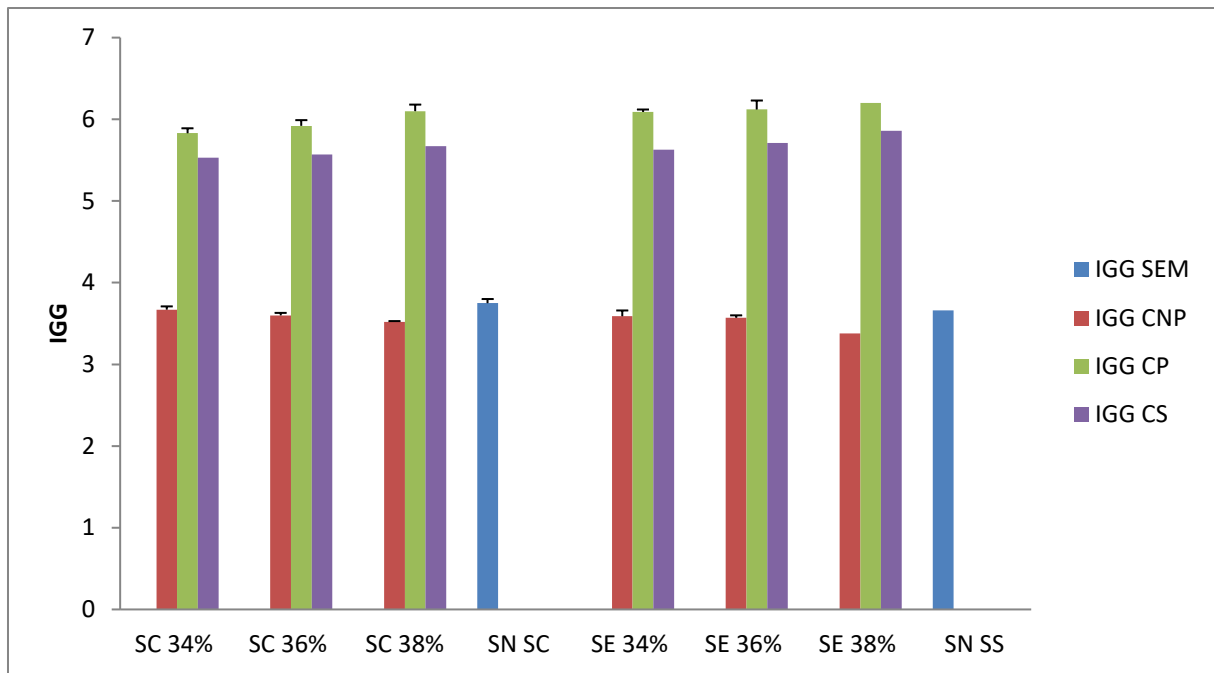


Figure 33 : Influence du taux d'hydratation sur l'indice de gonflement des gluténines

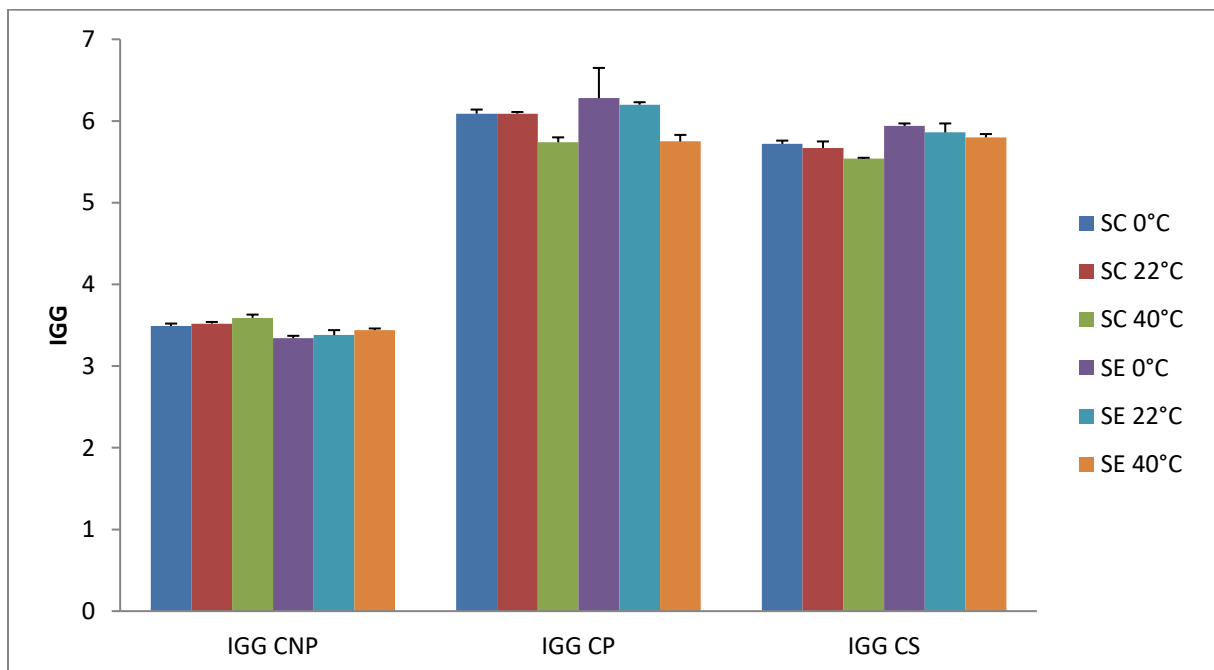


Figure 34 : Influence de la température sur l'indice de gonflement des gluténines

L'évolution de IGG en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation dépend du traitement. En effet, il ressort de l'analyse de la figure 33 qu'au fur et à mesure que le taux d'hydratation augmente IGG CNP diminue. Par contre, on note que le contraire se produit après la précuisson et le séchage du couscous. Les IGG CP et les IGG CS augmentent avec l'accroissement du taux d'hydratation (figure 33).

Concernant, l'évolution de IGG en fonction de la température de l'eau d'hydratation, et d'après la figure 34 IGG CNP augmente avec l'augmentation de la température de l'eau d'hydratation. Alors que, les IGG CP et les IGG CS diminuent avec l'augmentation de la température (figure 34).

L'analyse de la variance (tableau 23) fait apparaître un effet très hautement significatif ($p < 0,001$) du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation sur les IGG CNP et les IGG CP et un effet hautement significatif ($p < 0,01$) du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation sur les IGG CS.

Une relation entre les IGG et les GI des couscous est observée. Le calcul des corrélations (Annexe C) fait apparaître des corrélations significatives ($p < 0,05$) positives entre IGG des couscous et la teneur en GI des couscous ($r = 0,72$; $r = 0,7$; $r = 0,7$) pour les CNP, CP et CS respectivement. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Wang et Kovacs (2002b). D'après ces auteurs le test de IGG mesure principalement la capacité de gonflement de la GI et reflète la teneur en GI.

Une relation entre les IGG des couscous et la qualité du couscous est observée (Annexe C). L'IGG CS est corrélé significativement ($p < 0,05$) et positivement avec la D50 ($r = 0,82$), le gonflement à froid ($r = 0,68$) et l'IPMT ($r = 0,6$). En revanche, l'IGG CNP est corrélé significativement ($p < 0,05$) et négativement avec le rendement en couscous ($r = -0,65$) et positivement avec le rendement en semoules non agglomérées ($r = 0,81$).

Tableau 23 : Analyse de la variance de l'indice de gonflement des gluténines des couscous

	IGG CNP	IGG CP	IGG CS	IGG SEM
Moyenne	3,52	6,01	5,7	3,58
Maximum	3,71	6,71	5,99	3,81
Minimum	3,32	5,66	5,49	3,31
Ecart type	0,11	0,21	0,14	0,15
Coefficient de variation	3,05	3,5	2,49	4,25
Effet de la semoule	-	-	-	NS
Effet du taux d'hydratation	***	***	**	-
Effet de la température	***	***	**	-
Effet de l'hydratation et du roulage	***	-	-	-
Effet de la précuisson	-	***	-	-
Effet du séchage	-	-	***	-

*: Significatif à $p < 0,05$

** : Hautement significatif à $p < 0,01$

*** : Très hautement significatif à $p < 0,001$

NS : Non significatif.

4-3 Analyse électrophorétique

Les protéines extraites et réduites des semoules et des couscous au cours des différentes étapes de fabrications sont séparées par électrophorèse SDS-PAGE. La séparation est faite sur la base des différences des poids moléculaires. Les figures 35 et 36 représentent les diagrammes électrophorétiques des semoules et des couscous aux différents stades de fabrication en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation respectivement.

Les diagrammes électrophorétiques obtenus des différents échantillons étudiés sont constitués de 3 zones :

- Une zone constituée des α , β , γ -Gliadines et des sous unités gluténines de faibles poids moléculaire (LMW-GS).
- Une zone constituée des ω -Gliadines
- Une zone de faible mobilité constituée des sous unités gluténines de haut poids moléculaire (HMW-GS).

L'analyse des différentes bandes électrophorétiques en fonction du taux d'hydratation au cours des différentes étapes de fabrication du couscous (figure 35) montre qu'il n'existe aucune différence entre les différents échantillons étudiés confirmant les travaux de Dexter et Matsuo (1977) dans une étude similaire sur les spaghetti. En effet, il ne semble pas ressortir de modifications au niveau des sous unités observables dans les produits traités mécaniquement et thermiquement par rapport au témoin. Selon ces auteurs les taux d'hydratation des semoules dans le cas du procédé de fabrication des pâtes alimentaire ne permet pas de développer le gluten dans la même mesure que celle trouvée dans les pâtes à haute teneur en humidité comme la pâte à pain. Par conséquent, il n'est pas étonnant de constater qu'il n'y a pas de différence notable dans le comportement des protéines de semoule durant le processus de fabrication des spaghetti.

Le malaxage, permet d'obtenir une pâte granuleuse constituée d'agglomérats hydratés de particules de farine et/ou semoule. Cela est possible par un mélange peu énergique de la farine de blé en présence de faibles quantités d'eau (30-35% de la masse de farine). Ce procédé ne permet généralement pas le développement du réseau de gluten (Matsuo *et al.*, 1978; Dexter et Matsuo, 1979). De même, au cours du processus de fabrication du couscous, le changement dans la quantité d'eau et de la température induit des modifications

significatives dans la réactivité des composantes de la semoule. Cependant, la formation du 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 et Abecassis, 2006).

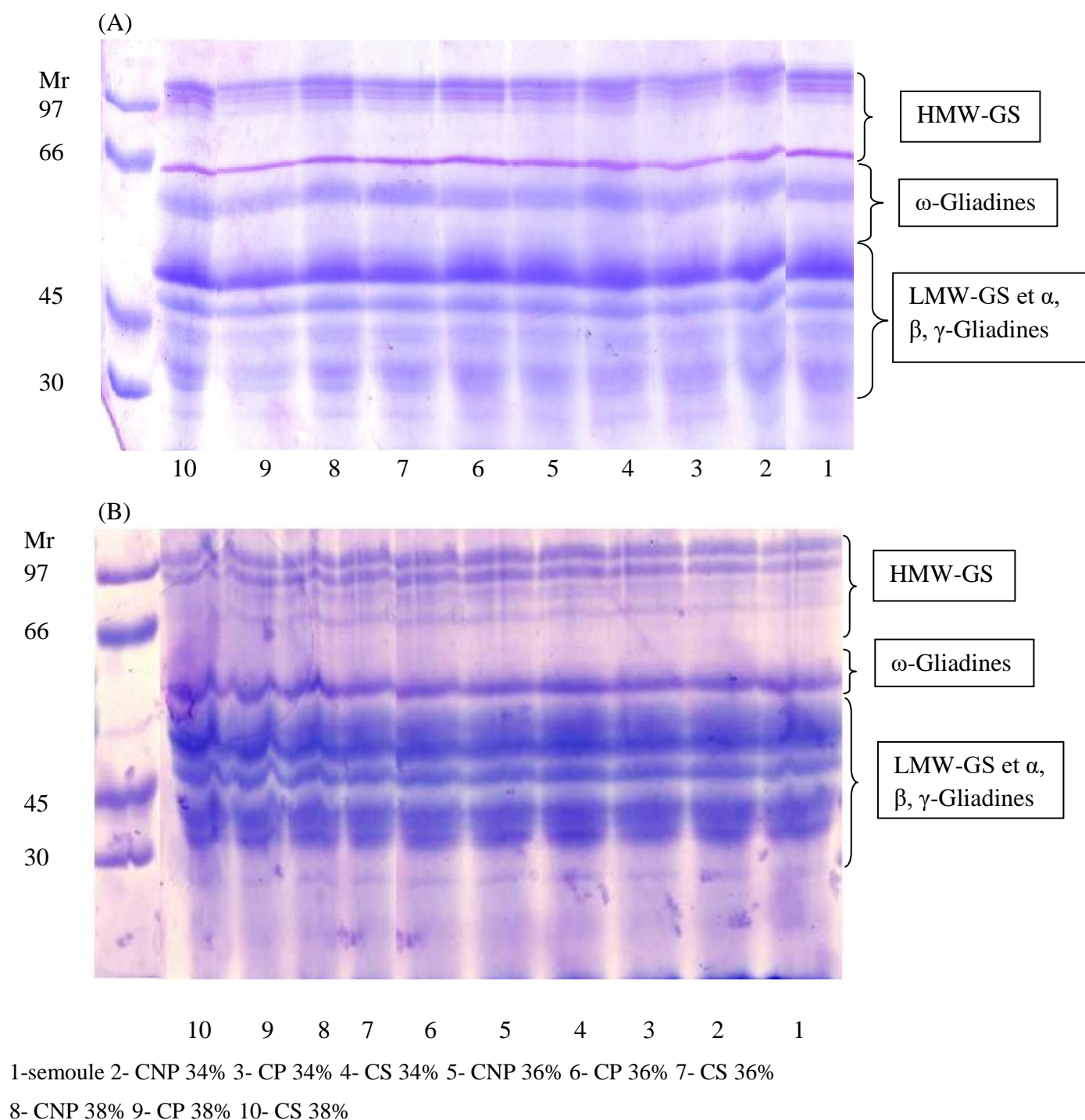
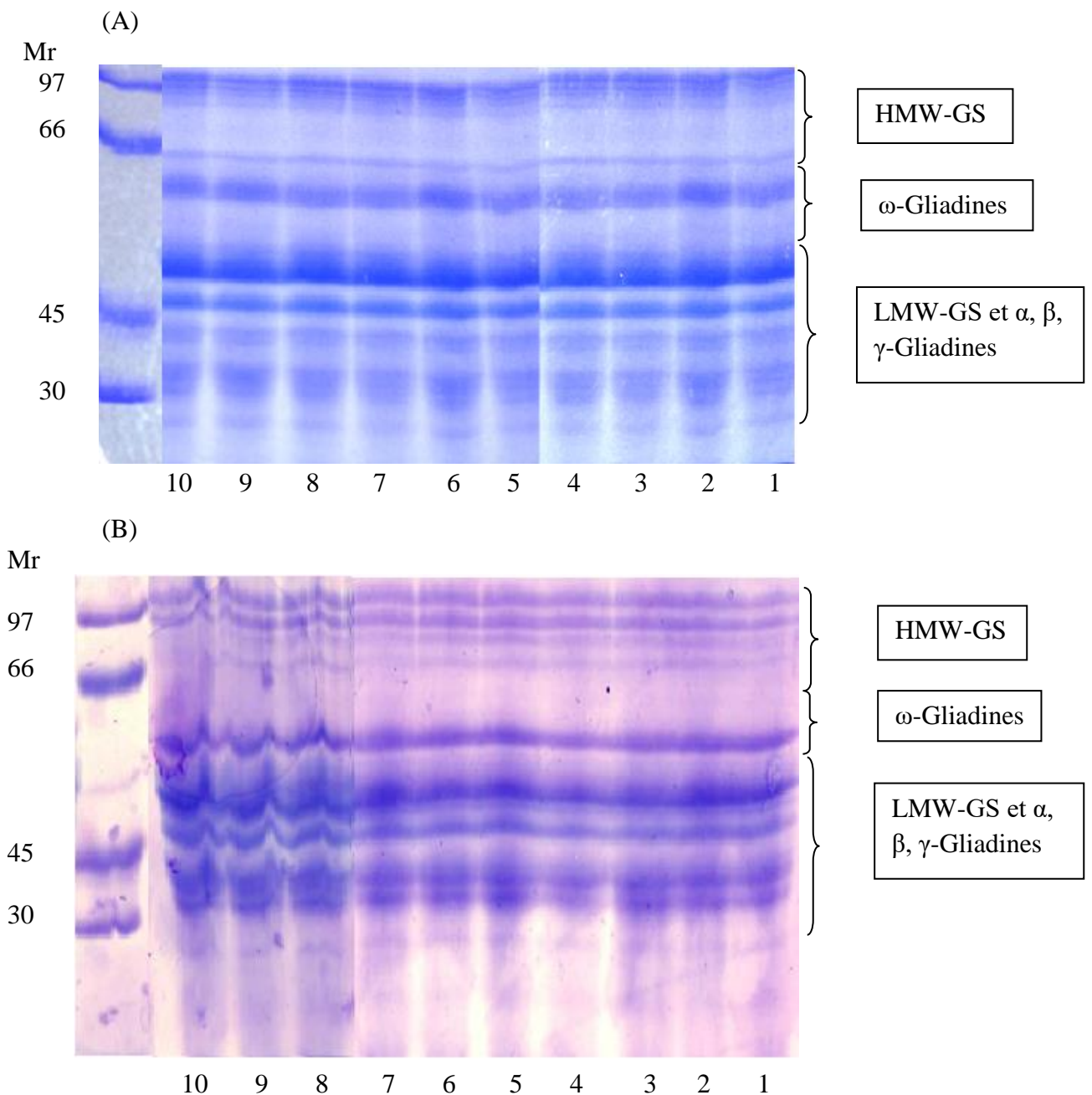


Figure 35 : Electrophorèse des protéines des semoules et des couscous aux différents stades de fabrication en fonction du taux d'hydratation : (A) semoule extra, (B) semoule courante



1-semoule 2- CNP 0°C 3- CP 0°C 4- CS 0°C 5- CNP 40°C 6- CP 40°C
 7- CS 40°C 8- CNP 22°C 9- CP 22°C 10- CS 22°C

Figure 36 : Electrophorèse des protéines des semoules et des couscous aux différents stades de fabrication en fonction de la température du taux d'hydratation : (A) semoule extra
 (B) semoule courante

De même, l'analyse des bandes électrophorétiques des échantillons roulés avec de l'eau à différentes température (0°C, 22°C, 40°C) et pour toutes les étapes de fabrication du couscous a montré qu'il n'existe aucune différence entre les échantillons (figure 36).

Conclusion du chapitre IV

A la lumière des résultats obtenus, nous observons que les protéines des semoules de blé dur subissent des modifications biochimiques durant les différentes étapes de la fabrication du couscous (hydratation/roulage, précuisson et séchage) et dépendent notamment, des conditions d'hydratation.

Lors de l'hydratation de la semoule et le roulage du couscous, les différentes fractions protéiques (PM, GS et GI) ont subi les modifications suivantes :

- les teneurs en PM diminuent. Cette diminution est probablement due à l'association des gluténines aux gliadines et aux globulines par des interactions hydrophobes. La diminution des teneurs des PM est proportionnelle aux taux d'hydratation et à la température de l'eau d'hydratation qui peuvent favoriser l'interaction des gliadines et des globulines avec les gluténines.
- Les teneurs en GS augmentent et les teneurs en GI diminuent. Ces résultats montrent que l'hydratation et le roulage des semoules provoquent une solubilisation des protéines insolubles au profit des gluténines solubles. L'évolution des teneurs en GS des CNP en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation montre l'augmentation importante des GS avec l'accroissement du taux d'hydratation. Inversement, les pourcentages des GI diminuent en fonction du taux d'hydratation. Par ailleurs, l'évolution des teneurs en GS et des GI en fonction de la température de l'eau d'hydratation montre que les GS diminuent avec l'augmentation de la température de l'eau d'hydratation alors que les GI augmentent. Ceci suggère que les fractions solubles sont moins extractibles avec l'augmentation de la température de 0 à 40°C. Cette diminution de solubilité des protéines revient peut être à l'augmentation des interactions entre les protéines et plus spécialement les interactions hydrophobes.

Après la précuisson et le séchage du couscous, les fractions protéiques (PM, GS et GI) présentent les modifications suivantes :

- Les teneurs des PM et des GS diminuent considérablement après la précuisson et le séchage des couscous tandis que les teneurs des GI augmentent amplement. Le traitement thermique et le séchage entraînent une réticulation disulfure à travers des réactions d'échange de SH-SS et l'oxydation de SH libre, conduisant à la formation de grands agrégats de protéines. La solubilité des protéines après la précuisson et le séchage, est plus faible quand les couscous sont roulés avec des taux d'hydratation croissants. Les teneurs

des PM diminuent lorsque la température de l'eau passe de 0°C à 22°C et elles augmentent pour la température 40°C. Par contre, pour les protéines polymériques les résultats montrent que les teneurs des GS augmentent avec l'augmentation de la température de 0°C à 40°C et les teneurs des GI sont inversement proportionnelles à la température.

Lors du roulage du couscous la quantité d'eau nécessaire pour l'hydratation de la semoule et le roulage du couscous n'est pas suffisante pour développer la pâte mais provoque la solubilité des GI. Cette solubilisation des protéines est nécessaire pour la formation des granules de couscous. De plus, ces modifications de solubilité des protéines polymériques jouent un rôle dans les rendements du roulage, la qualité technologique et culinaire du couscous.

L'évolution de l'IGG des couscous en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation dépend du traitement appliqué. En effet, l'augmentation du taux d'hydratation a provoqué une diminution des indices de gonflement des gluténines suite à une solubilité des protéines insolubles pour les couscous avant précuisson. Tandis que, pour les produits précuits et les produits séchés la dénaturation des protéines provoquée par le traitement hydrothermique a conduit à leur insolubilisation et par conséquent à une augmentation des indices de gonflement des gluténines des couscous. Cette dénaturation est plus prononcée pour le taux d'hydratation élevé. En revanche, l'IGG CNP augmente avec l'augmentation de la température de l'eau d'hydratation. Alors que, les IGG CP et les IGG CS diminuent avec l'augmentation de la température.

L'analyse des bandes électrophorétiques des protéines des couscous au différents stades de fabrications et en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation a permis de constater que les traitements du couscous (hydratation/roulage, précuisson et le séchage) et les conditions d'hydratation étudiées n'ont pas permis de développer un réseau protéique.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La présente étude porte sur l'étude et l'optimisation des conditions d'hydratation des semoules de blé dur sur la qualité du couscous et l'étude des modifications biochimiques des protéines. Après analyse de l'ensemble des résultats, il ressort les points suivants :

- L'effet du taux d'hydratation, montre que l'accroissement du taux d'hydratation augmente les rendements en couscous. Les caractéristiques physico-chimiques du couscous se trouvent influencer par le taux d'hydratation. En effet, la granulométrie médiane du couscous est d'autant plus élevée que le taux d'hydratation augmente. Alors que, la dispersion géométrique diminue. En ce qui concerne la coloration, l'accroissement du taux d'hydratation entraîne une augmentation de l'indice de brun et une diminution de l'indice de jaune.

- Le taux d'hydratation joue un rôle déterminant dans la qualité culinaire du couscous. Pour le gonflement à froid et à chaud, l'augmentation du taux d'hydratation améliore la capacité d'hydratation des couscous. En revanche, l'augmentation du taux d'hydratation a eu un effet néfaste sur le collant des produits. L'accroissement du taux d'hydratation a augmenté l'indice de solubilité et a diminué la délitescence.

- Les basses températures de l'eau d'hydratation T0°C sont favorables pour la formation des granules de couscous puisqu'elles engendrent moins de grumeaux et de semoules non agglomérées. Alors que, des températures plus élevées T22°C et T40°C conduisent à la formation de grandes quantités de grumeaux ce qui minimise les rendements de couscous et rende le roulage plus difficile.

- L'évolution de la granulométrie médiane en fonction de la température de l'eau d'hydratation dépend de la semoule mise en œuvre. De plus, le roulage avec de l'eau à la température ambiante permet d'obtenir des couscous de granulométrie plus homogène. Les couscous hydratés avec de l'eau T0°C présentent un meilleur gonflement à froid et à chaud, collent moins et sont moins délitescents que les produits roulés avec de l'eau T22°C et T40°C. L'indice de solubilité est plus faible chez les couscous roulés avec de l'eau T0°C. En revanche, lorsque la température de l'eau d'hydratation augmente de T0°C à T40°C, l'indice de brun ainsi que l'indice de jaune sont de plus en plus faibles.

- L'optimisation des conditions d'hydratation des différentes réponses fait ressortir que les valeurs des facteurs qui permettent d'optimiser le rendement et la qualité du couscous sont les suivants : un taux d'hydratation égale à 37,595% et une température égale à 4,443°C.

- Lors de l'hydratation de la semoule et du roulage du couscous les teneurs en PM diminuent. En revanche, les teneurs en GI diminuent suite à leur solubilisation au profit des GS qui augmentent. Cette solubilisation des protéines est nécessaire pour les formulations des granules de couscous et joue un rôle dans les rendements du roulage.

- Après la précuisson et le séchage du couscous, les teneurs des PM et des GS diminuent considérablement et les teneurs des GI augmentent amplement. Les traitements thermiques entraînent une réticulation des protéines conduisant ainsi à la formation de grands agrégats de protéines. Les modifications de solubilité des protéines polymériques jouent un rôle dans la qualité technologique et culinaire du couscous.

- L'évolution des teneurs des fractions protéiques étudiées et les (IGG) des couscous en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation dépend du traitement.

- L'analyse des bandes électrophorétiques des protéines des couscous aux différents stades de fabrications et en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation a permis de constater que mise à part les différences variétales nous n'observons pas de différences majeures entre les électrophorégrammes de la semoule et après traitements (hydratation/roulage, précuisson et le séchage). Selon le traitement utilisé, on peut supposer que des dépolymérisations soient plus ou moins accentuées, mais les types de sous unités participant encore au réseau protéique sont les mêmes qu'à l'état natif.

Perspectives

L'influence des conditions d'hydratation sur la qualité technologique du couscous semble être une étude très complexe. Les modifications biochimiques des protéines ne permettent pas à elles seules de comprendre cette influence. Alors, il serait intéressant d'étudier l'effet des conditions d'hydratations sur les autres composants biochimiques de la semoule (amidon, lipides, pentosanes), ainsi que, les interactions entre les différents constituants (protéines, amidon, lipides et pentosanes) de la semoule.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AACC 54-40 A, 1983. American association of cereal chemists. Approved method of the AACC. Method 54-40 approved in (1961). In: AACC, S.P., Minnesota. (Ed.).

Abecassis, J., Feillet, P., 1985. Pureté des semoules de ble dur, taux de cendres et réglementation. Ind. Cereales 36, 13-18.

Abecassis, J., Gautier, M.-F., Autran, J., 1990. La filière blé dur-pâtes alimentaires: apports complémentaires de la technologie et de la génétique dans l'amélioration de la qualité. Industries alimentaires et agricoles 107, 475-482.

Abecassis, J., Cuq, B., Boggini, G., Namoune, H., 2012. Other traditional durum-derived products. AACC International Press.

Abecassis, J., Abbou, R., Chaurand, M., Morel, M., Vernoux, P., 1994. Influence of extrusion conditions on extrusion speed, temperature, and pressure in the extruder and on pasta quality. Cereal chemistry 71, 247-253.

Aboubacar, A., Hamaker, B., 1999. Physicochemical properties of flours that relate to sorghum couscous quality. Cereal chemistry 76, 308-313.

Aboubacar, A., Hamaker, B., 2000. Low molecular weight soluble starch and its relationship with sorghum couscous stickiness. Journal of Cereal Science 31, 119-126.

Adrian, J., Frangne, R., 1987. Nature et propriétés de l'amidon. Industries des Céréales 46, 7-16.

AFNOR, NF V 50-001 1992. Céréales et produits à base de céréales - Couscous - Spécifications. Association Française de Normalisation.

AFNOR V03-050. Produits agricoles alimentaires - Directives générales pour le dosage de l'azote avec minéralisation selon la méthode de Kjeldahl.

AFNOR V03-707. Céréales et produits céréaliers - Détermination de la teneur en eau - Méthode de référence.

AFNOR V03-713. Céréales et produits céréaliers. Détermination de la teneur en matières grasses totales.

AFNOR V03-720. Céréales et produits de mouture - Détermination des cendres - Méthode par incinération à 900 degrés Celsius.

Ait Mouh, O., 1989. Influence des conditions de séchage à très haute température sur les propriétés des pâtes alimentaires.

Aluka, K., 1981. Etude et optimisation des conditions d'hydratation, de cuisson et de séchage de semoules de maïs en vue de la fabrication de couscous de maïs. Mem. Ing., INRA, Montpellier France.

Aluka, K., Miche, J., Faure, J., 1985. Conditions d'une fabrication mécanique du couscous de maïs en Afrique de l'Ouest. Industries alimentaires et agricoles 102, 457-461.

Anderson, R., Conway, H., Pfeifer, V., Griffin, E., 1969. Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion-cooking. Cereal Science Today 14, 4-&.

Auger, F., 2008. Etude des mécanismes d'agglomération du gluten au cours du pétrissage de suspensions farine-eau. Montpellier SupAgro.

Aussenac, T., Carceller, J.-L., Kleiber, D., 2001. Changes in SDS solubility of glutenin polymers during dough mixing and resting. Cereal chemistry 78, 39-45.

Autran, J., Berrier, R., 1984. Durum wheat functional protein subunits revealed through heat treatment. Biochemical and genetical implications. Proc 2nd Int Workshop Gluten Proteins. Wageningen, TNO, pp. 175-183.

Bar, C., 2001. Contrôle de la qualité des céréales et des protéagineux: guide pratique. ITCF.

Barkouti, A., 2012. Agglomération humide de poudres à réactivité de surface-Approche mécanistique de la morphogenèse de structures alimentaires agglomérées. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.

Barkouti, A., Rondet, E., Delalonde, M., Ruiz, T., 2012. Influence of physicochemical binder properties on agglomeration of wheat powder in couscous grain. Journal of Food Engineering 111, 234-240.

Bekraddouma, D., 1992. Influence du traitement hydrothermique de précuisson et de séchage sur la valeur nutritionnelle du couscous de blé dur.

Belaid, M.R., Khendek, D., Belarbi, A., 1994. Rôle des monoglycerides dans l'expression de la qualité du couscous de blé dur : complexation, amylose-MG. Mem. Ing., INA, El-Harrach, Alger

Belloq, B., Duri, A., Cuq, B., Ruiz, T., 2018. Impacts of the size distributions and protein contents of the native wheat powders in their structuration behaviour by wet agglomeration. *Journal of Food Engineering* 219, 29-37.

Belton, P., 1999. Mini review: on the elasticity of wheat gluten. *Journal of Cereal Science* 29, 103-107.

Booth, M., Bottomley, R., Ellis, J., Malloch, G., Schofield, J., Timms, M., 1980. effect of heat on gluten-physicochemical properties and baking quality. *Annales de technologie agricole*.

Borrelli, G., Troccoli, A., Di Fonzo, N., Fares, C., 1999. Durum wheat lipoxygenase activity and other quality parameters that affect pasta color. *Cereal Chem* 76, 335-340.

Borrelli, G., De Leonardis, A., Fares, C., Platani, C., Di Fonzo, N., 2003. Effects of modified processing conditions on oxidative properties of semolina dough and pasta. *Cereal chemistry* 80, 225-231.

Boudreau, A., Ménard, G., 1992. Le blé: éléments fondamentaux et transformation. Presses Université Laval.

Bruneel, C., Lagrain, B., Brijs, K., Delcour, J.A., 2011. Redox agents and N-ethylmaleimide affect the extractability of gluten proteins during fresh pasta processing. *Food Chemistry* 127, 905-911.

Bruneel, C., Buggenhout, J., Lagrain, B., Brijs, K., Delcour, J.A., 2016. Redox agents and N-ethylmaleimide affect protein polymerization during laboratory scale dry pasta production and cooking. *Food Chemistry* 196, 646-653.

Charbonnier, L., 1974. Isolation and characterization of ω -gliadin fractions. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure* 359, 142-151.

Choi, W.S., Chung, K.J., Chang, M.S., Chun, J.K., Lee, H.W., Hong, S.Y., 1993. A turbidimetric determination of protein by trichloroacetic acid. Archives of Pharmacal Research 16, 57-61.

codex alimentarius, CODEX STAN 202-1995. Norme codex pour le couscous.

Cuq, B., 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.

Cuq, B., Mandato, S., Jeantet, R., Saleh, K., Ruiz, T., 2013. Food powder agglomeration. Handbook of Food Powders, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition No. 255, pp. 150-177.

Dachkevitch, T., Autran, J.-C., 1989. Prediction of baking quality of bread wheats in breeding programs by size-exclusion high-performance liquid chromatography. Cereal Chem 66, 448-456.

Dacosta, Y., 1986. Le gluten de blé et ses applications. APRIA.

Dahoun-Lefkir, S., 2005. Influence des conditions de l'hydratation sur la qualité technologique du couscous. Thèse de Magister, INA, El-Harrach, Alger.

Daniel, C., Triboi, E., 2000. Effects of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat: effects on gliadin content and composition. Journal of Cereal Science 32, 45-56.

Debbouz, A., Doetkott, C., 1996. Effect of process variables on spaghetti quality. Cereal chemistry 73, 672-676.

Debbouz, A., Donnelly, B., 1996. Process effect on couscous quality. Cereal chemistry 73, 668-671.

Debbouz, A., Dick, J., Donnelly, B., 1994. Influence of raw material on couscous quality. Cereal Foods World 39, 231-236.

D'Egidio, M., Pagani, M., 2010. Pasta and couscous: basic foods of Mediterranean tradition. TECNICA MOLITORIA 61, 105-115.

- Delcros, J.-F., Rakotozafy, L., Boussard, A., Davidou, S., Porte, C., Potus, J., Nicolas, J., 1998.** Effect of mixing conditions on the behavior of lipoxygenase, peroxidase, and catalase in wheat flour doughs. *Cereal chemistry* 75, 85-93.
- Deng, Z., Tian, J., Zhao, L., Zhang, Y., Sun, C., 2008.** High Temperature-induced Changes in High Molecular Weight Glutenin Subunits of Chinese Winter Wheat and its Influences on the Texture of Chinese Noodles. *Journal of agronomy and crop science* 194, 262-269.
- Derouiche, M., 2003.** Couscous : enquête de consommation à Constantine, fabrication artisanale et qualité. Université Mentouri Constantine, Algérie, p. 125.
- Dexter, J., Matsuo, R., 1977.** Influence of protein content on some durum wheat quality parameters. *Canadian Journal of Plant Science* 57, 717-727.
- Dexter, J., Matsuo, R., 1979.** Effect of water content on changes in semolina proteins during dough-mixing. *Cereal chemistry* 56, 15-19.
- Dexter, J.E., Matsuo, R.R., 1980.** Relationship between durum wheat protein properties and pasta dough rheology and spaghetti cooking quality. *Journal of agricultural and food chemistry* 28, 899-902.
- Dick, J., Matsuo, R., 1988.** Durum wheat and pasta products. *Wheat: Chemistry and technology* 2, 507-547.
- Djema, I., 2000.** Influence du taux d'extraction et de la granulométrie de la semoule sur la qualité technologique du couscous de blé dur. Thèse de Magister, INA, El-Harrach, Alger
- Domenek, S., Morel, M.-H., Bonicel, J., Guilbert, S., 2002.** Polymerization kinetics of wheat gluten upon thermosetting. A mechanistic model. *Journal of agricultural and food chemistry* 50, 5947-5954.
- Domenek, S., Brendel, L., Morel, M.-H., Guilbert, S., 2004.** Swelling behavior and structural characteristics of wheat gluten polypeptide films. *Biomacromolecules* 5, 1002-1008.
- Don, C., Lichtendonk, W.J., Plijter, J.J., Hamer, R.J., 2003.** Understanding the link between GMP and dough: from glutenin particles in flour towards developed dough. *Journal of Cereal Science* 38, 157-165.

- Don, C., Lichtendonk, W.J., Plijter, J.J., van Vliet, T., Hamer, R.J., 2005.** The effect of mixing on glutenin particle properties: aggregation factors that affect gluten function in dough. *Journal of Cereal Science* 41, 69-83.
- Drapron, R., 1985.** Enzyme activity as a function of water activity. *Properties of water in foods*. Springer, pp. 171-190.
- Edwards, N., Scanlon, M., Kruger, J., Dexter, J., 1996.** Oriental noodle dough rheology: Relationship to water absorption, formulation, and work input during dough sheeting. *Cereal chemistry* 73, 708-711.
- Edwards, N., Gianibelli, M., McCaig, T., Clarke, J., Ames, N., Larroque, O., Dexter, J., 2007.** Relationships between dough strength, polymeric protein quantity and composition for diverse durum wheat genotypes. *Journal of Cereal Science* 45, 140-149.
- Eliasson, A.C., Larsson, K., 1993.** *Cereals in breadmaking: a molecular colloidal approach*. Marcel Dekker.
- Ewart, J., 1968.** A hypothesis for the structure and rheology of glutenin. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 19, 617-623.
- Ewart, J., 1990.** Comments on recent hypotheses for glutenin. *Food Chemistry* 38, 159-169.
- Feillet, P., 1986.** L'industrie des pâtes alimentaires: technologies de fabrication, qualité des produits finis et des matières premières. *Ind. Agric. Alim.*, 103, 979-989.
- Feillet, P., 2000.** *Le grain de blé: composition et utilisation*. Editions Quae.
- Feillet, P., Fevre, E., Kobrehel, K., 1977.** Modifications in durum wheat protein properties during pasta dough sheeting. *Cereal chemistry*.
- Foti, S., Saletti, R., Gilbert, S., Tatham, A., Shewry, P., 2000.** Verification of the cDNA Deduced Sequences of Glutenin Subunits by Maldi-MS. *SPECIAL PUBLICATION-ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY* 261, 175-178.
- Fu, B., Kovacs, M., 1999.** Rapid single-step procedure for isolating total glutenin proteins of wheat flour. *Journal of Cereal Science* 29, 113-116.

Galiba, M., Waniska, R., Rooney, L., Miller, F., 1988. Couscous quality of sorghum with different kernel characteristics. *Journal of Cereal Science* 7, 183-193.

Gianibelli, M.C., Larroque, O.R., MacRitchie, F., Wrigley, C.W., 2001. Biochemical, Genetic, and Molecular Characterization of Wheat Endosperm Proteins. *Cereal chemistry* 78, 635-646.

Grant, A., Belton, P., Colquhoun, I., Parker, M., Plijter, J., Shewry, P., Tatham, A., Wellner, N., 1999. Effects of temperature on sorption of water by wheat gluten determined using deuterium nuclear magnetic resonance. *Cereal chemistry* 76, 219-226.

Graveland, A., Bongers, P., Bosveld, P., 1979. Extraction and fractionation of wheat flour proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 30, 71-84.

Graveland, A., Bosveld, P., Lichtendonk, W.J., Moonen, H., Scheepstra, A., 1982. Extraction and fractionation of wheat flour proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 33, 1117-1128.

Graveland, A., Bosveld, P., Lichtendonk, W., Marseille, J., Moonen, J., Scheepstra, A., 1985. A model for the molecular structure of the glutenins from wheat flour. *Journal of Cereal Science* 3, 1-16.

Guezlane, L., 1993. Mise au point de méthodes de caractérisation et études des modifications physico-chimiques sous l'effet de traitements hydro-thermiques en vue d'optimiser la qualité du couscous de blé dur. Thèse de Doctorat d'état, INA, El-Harrach.

Guezlane, L., Abecassis, J., 1991. Méthodes d'appréciation de la qualité culinaire du couscous de blé dur. *Industries alimentaires et agricoles* 108, 966-971.

Guezlane, L., Selselet-Attou, G., Senator, A., 1986. Etude comparée de couscous de fabrication industrielle et artisanale. *Industries des Céréales* 43, 25-29.

Guezlane, L., Abecassis, J., Morel, M., 1998. Effet des traitements hydrothermiques du couscous de blé dur sur le comportement des protéines. *Annales de l'Institut national agronomique-El Harrach (Alger)* 19, 72-81.

Gupta, R., Batey, I., MacRitchie, F., 1992. Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chem* 69, 125-131.

Gupta, R., Khan, K., Macritchie, F., 1993. Biochemical basis of flour properties in bread wheats. I. Effects of variation in the quantity and size distribution of polymeric protein. *Journal of Cereal Science* 18, 23-41.

Hafsa, I., Mandato, S., Ruiz, T., Schuck, P., Jeantet, R., Mejean, S., Chevallier, S., Cuq, B., 2015. Impact of the agglomeration process on structure and functional properties of the agglomerates based on the durum wheat semolina. *Journal of Food Engineering* 145, 25-36.

Hamer, R.J., Lichtendonk, W.J., 1987. Structure-function studies on gluten proteins: Reassembly of glutenin proteins after mixing. Lasztity, R. Bekes, F., *Proceedings of the 3rd International Workshop on Gluten Proteins, Budapest, Hungary, May 9-12, 1987, 227-237.*

Hebrard, A., 2002. Agglomération de la semoule de blé dur en couscous. *École nationale supérieure agronomique (Montpellier).*

Hébrard, A., Oulahna, D., Galet, L., Cuq, B., Abecassis, J., Fages, J., 2003. Hydration properties of durum wheat semolina: influence of particle size and temperature. *Powder technology* 130, 211-218.

Hebrard, A., Oulahna, D., Galet, L., Fages, J., Samson, M.-F., Morel, M.H., Abecassis, J., 2001. Etude morpho-granulométrique et structurale des semoules de blé dur propriétés d'hydratation et d'agglomération. *3e Colloque Science et Technologie des Poudres. LAVOISIER, Technique et Documentation, Paris, pp. 489-496.*

Hoseney, R., Zeleznak, K., Lai, C., 1986. Wheat gluten-a glassy polymer. *Cereal chemistry* 63, 285-286.

Hu, X.-Z., Wei, Y.-M., Wang, C., Kovacs, M., 2007. Quantitative assessment of protein fractions of Chinese wheat flours and their contribution to white salted noodle quality. *Food Research International* 40, 1-6.

Icard, C., Feillet, P., 1997. Effets des phénomènes d'oxydo-réduction au cours de la fabrication des pâtes alimentaires. *Industries alimentaires et agricoles* 114, 4-19.

Icard-Verniere, C., Feillet, P., 1999. Effects of mixing conditions on pasta dough development and biochemical changes. *Cereal chemistry* 76, 558-565.

- Jazaeri, S., Bock, J.E., Bagagli, M.P., Iametti, S., Bonomi, F., Seetharaman, K., 2015.** Structural modifications of gluten proteins in strong and weak wheat dough during mixing. *Cereal chemistry* 92, 105-113.
- Jeanjean, M., Damidaux, R., Feillet, P., 1980.** Effect of Heat Treatment on Protein Solubility and Viscoelastic Properties of Wheat Gluten. *Cereal Chem* 57, 325-333.
- Jia, Y.-Q., Masbou, V., Aussenac, T., Fabre, J., Debaeke, P., 1996.** Effects of nitrogen fertilization and maturation conditions on protein aggregates and on the breadmaking quality of Soissons, a common wheat cultivar. *Cereal chemistry* 73, 123-130.
- Joubert, M., Lullien-Pellerin, V., Morel, M.-H., 2018.** Fate of SDS-insoluble glutenin polymers from semolina to dry pasta. *Food Chemistry* 240, 189-195.
- Kasarda, D.D., 1989.** Glutenin structure in relation to wheat quality. *Wheat is unique*, 277-302.
- Kasarda, D., Bernardin, J., Nimmo, C., 1976.** Wheat proteins. *Advances in cereal science and technology* 1, 158-236.
- Keck-Gassenmeier, B., Wieser, H., 1996.** Disulfide bonds in acetic acid soluble and insoluble glutenin fractions. *Proceedings of the 6111 International Gluten Workshop, Sidney September*, pp. 1-6.
- Kite, F.E., Schoch, T., Leach, H.W., 1957.** Granule swelling and paste viscosity of thick-boiling starches. *Bakers Dig* 31, 42-44.
- Kobrehel, K., Abecassis, J., 1985.** Influence de la température de séchage des pâtes alimentaires sur l'activité et la composition des peroxydases en relation avec la couleur des produits. *Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie* 18, 277-280.
- Köhler, P., Belitz, H.-D., Wieser, H., 1993.** Disulphide bonds in wheat gluten: further cystine peptides from high molecular weight (HMW) and low molecular weight (LMW) subunits of glutenin and from γ -gliadins. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A* 196, 239-247.
- Kratzer, A.M., 2007.** Hydration, dough formation and structure development in durum wheat pasta processing.

Kurowska, E., Bushuk, W., 1988. Solubility of flour and gluten protein in a solvent of acetic acid, urea, and cetyltrimethylammonium bromide, and its relationship to dough strength. *Cereal Chem* 65, 156-158.

Laemmli, U.K., 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature* 227, 680-685.

Lagrain, B., Brijs, K., Veraverbeke, W.S., Delcour, J.A., 2005. The impact of heating and cooling on the physico-chemical properties of wheat gluten–water suspensions. *Journal of Cereal Science* 42, 327-333.

Lagrain, B., Thewissen, B.G., Brijs, K., Delcour, J.A., 2008. Mechanism of gliadin–glutenin cross-linking during hydrothermal treatment. *Food Chemistry* 107, 753-760.

Laignelet, B., 1983. Oxidations during the mixing of durum wheat semolina [colour, cooking quality, gluten, lipoxygenase, pasta products]. *Sciences des Aliments* 3, 469.

Laignelet, B., Kobrehel, K., Feillet, P., 1972. Le problème de la coloration des pâtes alimentaires. *Ind. Ali. Agri.* 89, 418-425.

Lamacchia, C., Di Luccia, A., Baiano, A., Gambacorta, G., La Gatta, B., Pati, S., La Notte, E., 2007. Changes in pasta proteins induced by drying cycles and their relationship to cooking behaviour. *Journal of Cereal Science* 46, 58-63.

Larsson, H., Eliasson, A.-C., 1996. Phase separation of wheat flour dough studied by ultracentrifugation and stress relaxation. I: Influence of water content. *Cereal chemistry* 73, 18-24.

Lefebvre, J., Popineau, Y., Deshayes, G., Lavenant, L., 2000. Temperature-induced changes in the dynamic rheological behavior and size distribution of polymeric proteins for gluteins from wheat near-isogenic lines differing in HMW glutenin subunit composition. *Cereal chemistry* 77, 193-201.

Lefkir, S., Yahiaoui, K., Yesli, A., Ounane, G., 2017. Hydration rate influence on the couscous quality. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 15, 5-11.

Lindsay, M.P., Skerritt, J.H., 1999. The glutenin macropolymer of wheat flour doughs: structure–function perspectives. *Trends in Food Science & Technology* 10, 247-253.

- MacRitchie, F., 1975.** Mechanical degradation of gluten proteins during high-speed mixing of doughs. *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*. Wiley Online Library, pp. 85-90.
- MacRitchie, F., 1992.** Physicochemical properties of wheat proteins in relation to functionality. *Advances in food and nutrition research* 36, 1-87.
- Maghirang, E., Lookhart, G., Bean, S., Pierce, R., Xie, F., Caley, M., Wilson, J., Seabourn, B., Ram, M., Park, S., 2006.** Comparison of quality characteristics and breadmaking functionality of hard red winter and hard red spring wheat. *Cereal chemistry* 83, 520-528.
- Malcolmson, L., Matsuo, R., Balshaw, R., 1993.** Textural optimization of spaghetti using response surface methodology: effects of drying temperature and durum protein level. *Cereal chemistry* 70, 417-423.
- Masci, S., Egorov, T., Ronchi, C., Kuzmicky, D., Kasarda, D., Lafiandra, D., 1999.** Evidence for the presence of only one cysteine residue in the D-type low molecular weight subunits of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science* 29, 17-25.
- Matsuo, R., Dexter, J., Dronzek, B., 1978.** Scanning electron microscopy study of spaghetti processing. *Cereal Chemistry* 55, 744-753.
- Matveef, M., 1969.** Etude granulometrique et physico-chimique des semoules industrielles. *Bull. ENSMIC*. 230 75-82.
- Mecham, D., Sokol, H., Pence, J., 1962.** Extractable protein and hydration characteristics of flours and doughs in dilute acid. *Cereal Chem* 39, 1962.
- Melas, V., Morel, M.-H., Feillet, P., 1993.** Les sous-unites glutenines du ble de faible poids moleculaire: des proteines d'avenir? *Industries des Céréales*, 3-3.
- Mezroua, L., 2011.** Etude de la qualité culinaire de quelques couscous industriels et artisanaux et effet d'adjonction de la matière grasse durant la cuisson. Mémoire Magister, INATAA, Université Mentouri Constantine.
- Osborne, T.B., 1907.** The proteins of the wheat kernel. Carnegie institution of Washington.

Ounane, G., Cuq, B., Abecassis, J., Yesli, A., Ounane, S.M., 2006. Effects of physicochemical characteristics and lipid distribution in Algerian durum wheat semolinas on the technological quality of couscous. *Cereal chemistry* 83, 377-384.

Payne, P., Corfield, K., Blackman, J., 1979. Identification of a high-molecular-weight subunit of glutenin whose presence correlates with bread-making quality in wheats of related pedigree. *TAG Theoretical and Applied Genetics* 55, 153-159.

Payne, P.I., Corfield, K.G., Holt, L.M., Blackman, J.A., 1981. Correlations between the inheritance of certain high-molecular weight subunits of glutenin and bread-making quality in progenies of six crosses of bread wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 32, 51-60.

Payne, P., Holt, L.M., Jackson, E.A., Law, C., Damania, A., 1984. Wheat storage proteins: their genetics and their potential for manipulation by plant breeding. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 304, 359-371.

Petitot, M., Brossard, C., Barron, C., Larré, C., Morel, M.-H., Micard, V., 2009. Modification of pasta structure induced by high drying temperatures. Effects on the in vitro digestibility of protein and starch fractions and the potential allergenicity of protein hydrolysates. *Food Chemistry* 116, 401-412.

Pomeranz, Y., 1965. Dispersibility of wheat proteins in aqueous urea solutions—a new parameter to evaluate bread-making potentialities of wheat flours. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 16, 586-593.

Pomeranz, Y., 1988. *Wheat: chemistry and technology.* AACC monograph series (USA).

Potus, J., Drapron, R., Rakotozafy, L., 1992. Rôle de l'eau sur les interactions moléculaires conduisant à la formation des pâtes de farines de blé. *Industries des Céréales*, 13-21.

Pritchard, P., Brock, C., 1994. The glutenin fraction of wheat protein: The importance of genetic background on its quantity and quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 65, 401-406.

Roman-Gutierrez, A.D., Guilbert, S., Cuq, B., 2002. Frozen and unfrozen water contents of wheat flours and their components. *Cereal chemistry* 79, 471-475.

Rondet, E., Cuq, B., Cassan, D., Ruiz, T., 2016. Agglomeration of wheat powders by a novel reverse wet agglomeration process. *Journal of Food Engineering* 173, 92-105.

Saad, M., Rondet, E., Ruiz, T., Cuq, B., Barkouti, A., 2010. Réactivité et mécanismes d'agglomération de la semoule de blé dur: description de la croissance et de la texture des agglomérats. *Industries des Céréales* 169, 30-31.

Saad, M.M., Barkouti, A., Rondet, E., Ruiz, T., Cuq, B., 2011. Study of agglomeration mechanisms of food powders: application to durum wheat semolina. *Powder technology* 208, 399-408.

Sapirstein, H.D., Fu, B.X., 1998. Intercultivar variation in the quantity of monomeric proteins, soluble and insoluble glutenin, and residue protein in wheat flour and relationships to breadmaking quality. *Cereal chemistry* 75, 500-507.

Sapirstein, H., David, P., Preston, K., Dexter, J., 2007. Durum wheat breadmaking quality: Effects of gluten strength, protein composition, semolina particle size and fermentation time. *Journal of Cereal Science* 45, 150-161.

Schofield, J., Booth, M., 1983. Wheat proteins and their technological significance. *Developments in food proteins* 2, 1-65.

Schofield, J., Bottomley, R., Timms, M., Booth, M., 1983. The effect of heat on wheat gluten and the involvement of sulphhydryl-disulphide interchange reactions. *Journal of Cereal Science* 1, 241-253.

Schofield, J., Bottomley, R., LeGrys, G., Timms, M., Booth, M., 1984. Effects of heat on wheat gluten. *Proceeding 2nd International Workshop on Gluten Proteins*. Wageningen: TNO Institute for Cereals, Flour and Bread. P, pp. 81-90.

Shewry, P., Tatham, A., 1997. Disulphide bonds in wheat gluten proteins. *Journal of Cereal Science* 25, 207-227.

Shewry, P.R., Popineau, Y., Lafiandra, D., Belton, P., 2000. Wheat glutenin subunits and dough elasticity: findings of the EUROWHEAT project. *Trends in Food Science & Technology* 11, 433-441.

Shewry, P.R., Tatham, A.S., Forde, J., Kreis, M., Miflin, B.J., 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science* 4, 97-106.

Singh, N., Donovan, R., MacRitchie, F., 1990. Use of sonication and size-exclusion high-performance liquid chromatography in the study of wheat flour proteins. II. Relative quantity of glutenin as a measure of breadmaking quality. *Cereal chemistry* 67, 161-170.

Sissons, M.J., Ames, N.P., Hare, R.A., Clarke, J.M., 2005. Relationship between glutenin subunit composition and gluten strength measurements in durum wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 2445-2452.

Skerritt, J.H., Hac, L., Bekes, F., 1999a. Depolymerization of the glutenin macropolymer during dough mixing: I. Changes in levels, molecular weight distribution, and overall composition. *Cereal chemistry* 76, 395-401.

Skerritt, J.H., Hac, L., Lindsay, M.P., Bekes, F., 1999b. Depolymerization of the glutenin macropolymer during mixing: II. Differences in retention of specific glutenin subunits. *Cereal chemistry* 76, 402-409.

Suchy, J., Lukow, O.M., Fu, B.X., 2003. Quantification of monomeric and polymeric wheat proteins and the relationship of protein fractions to wheat quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83, 1083-1090.

Tanaka, K., Bushuk, W., 1973. Changes in flour proteins during dough-mixing. I. Solubility results. *Cereal chemistry*.

Tatham, A.S., Shewry, P.R., 1985. The conformation of wheat gluten proteins. The secondary structures and thermal stabilities of α -, β -, γ - and ω -gliadins. *Journal of Cereal Science* 3, 103-113.

Tazerout, C., 2013. Etudes biochimique et technologique de quelques fractions de mouture de blé dur: Relation avec la qualité boulangère. Mémoire Magister, ENSA, El Harrach, Alger.

Tigroudja, F., Bendjoudiouadda, A., 1999. Influence de la granulométrie de la semoule sur la qualité technologique du couscous (artisanal) de blé dur. Mem. Ing., INA, El-Harrach, Alger.

- Trentesaux, E., 1995.** Evaluation de la qualité du blé dur. Proceedings of the Seminar on Durum Wheat Quality in the Mediterranean Region. CIHEAM (Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes): Zaragoza, Spain, pp. 53-59.
- Tsen, C., 1967.** Changes in flour proteins during dough mixing. *Cereal Chem* 44, 1967.
- Tsiami, A., Bot, A., Agterof, W., 1997.** Rheology of mixtures of glutenin subfractions. *Journal of Cereal Science* 26, 279-287.
- Uthayakumaran, S., Gras, P., Stoddard, F., Bekes, F., 1999.** Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ratio on the functional properties of wheat dough. *Cereal chemistry* 76, 389-394.
- Uthayakumaran, S., Newberry, M., Keentok, M., Stoddard, F., Bekes, F., 2000.** Basic rheology of bread dough with modified protein content and glutenin-to-gliadin ratios. *Cereal chemistry* 77, 744-749.
- Viot, D., 1992.** Amidons endommagés ni trop, ni trop peu. *Industries des Céréales*, 25-29.
- Wagner, M., 2010.** Impact des traitements hydrothermiques sur les propriétés technofonctionnelles de produits céréaliers. Montpellier, SupAgro.
- Wang, C., Kovacs, M., 2002a.** Swelling index of glutenin test for prediction of durum wheat quality. *Cereal chemistry* 79, 197-202.
- Wang, C., Kovacs, M., 2002b.** Swelling index of glutenin test. I. Method and comparison with sedimentation, gel-protein, and insoluble glutenin tests. *Cereal chemistry* 79, 183-189.
- Wang, C., Kovacs, M., 2002c.** Swelling index of glutenin test. II. Application in prediction of dough properties and end-use quality. *Cereal chemistry* 79, 190-196.
- Wang, J.-s., Zhao, M.-m., Zhao, Q.-z., 2007.** Correlation of glutenin macropolymer with viscoelastic properties during dough mixing. *Journal of Cereal Science* 45, 128-133.
- Wang, X.-Y., Guo, X.-N., Zhu, K.-X., 2016.** Polymerization of wheat gluten and the changes of glutenin macropolymer (GMP) during the production of Chinese steamed bread. *Food Chemistry* 201, 275-283.

Weegels, P., Hamer, R., Schofield, J., 1996a. Functional properties of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science* 23, 1-17.

Weegels, P., Hamer, R., Schofield, J., 1997. Depolymerisation and re-polymerisation of wheat glutenin during dough processing. II. Changes in composition. *Journal of Cereal Science* 25, 155-163.

Weegels, P., Verhoek, J., De Groot, A., Hamer, R., 1994. Effects on gluten of heating at different moisture contents. I. Changes in functional properties. *Journal of Cereal Science* 19, 31-38.

Weegels, P., Van de Pijpekamp, A., Graveland, A., Hamer, R., Schofield, J., 1996b. Depolymerisation and re-polymerisation of wheat glutenin during dough processing. I. Relationships between glutenin macropolymer content and quality parameters. *Journal of Cereal Science* 23, 103-111.

Wieser, H., Bushuk, W., MacRitchie, F., 2006. The polymeric glutenins. Gliadin and glutenin: the unique balance of wheat quality. *St. Paul American Association of Cereal Chemistry*, 213-240.

Wrigley, C., Bietz, J., 1988. Proteins and amino acids. In: Pomeranz, Y. (Ed.), *Wheat: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists, Saint Paul, NM, pp. 159-275.

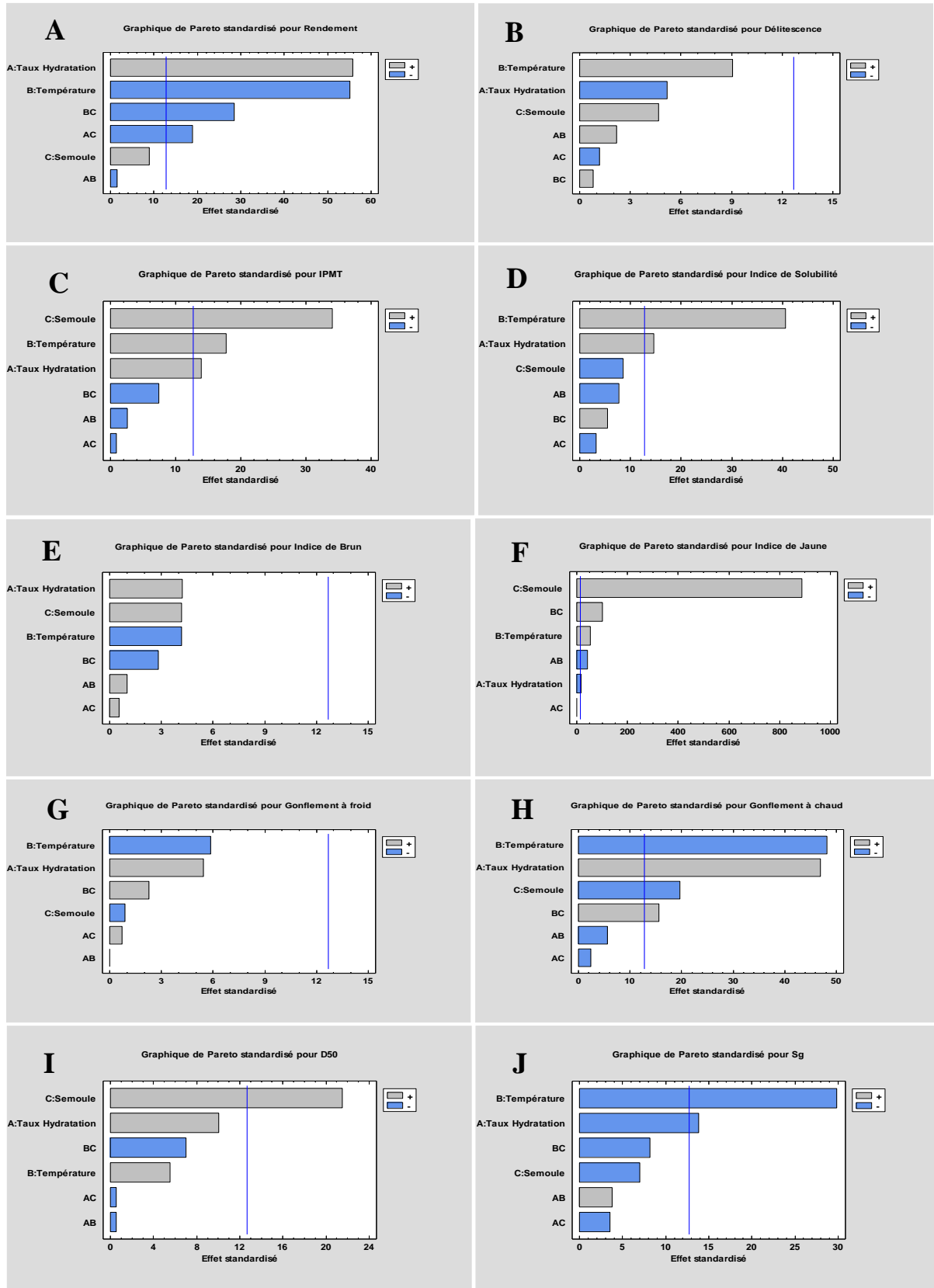
Yettou, N., 1998. Les méthodes instrumentales d'appréciation de la qualité culinaire du couscous de blé dur. *Mémoire de Magister, INA, El-Harrach, Alger* 101.

Yettou, N., Guezlane, L., 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*, pp. 7-9.

Yettou, N., Ait Kaci, M., Guezlane, L., Ait-Amar, H., 1997. Détermination des caractéristiques viscoélastiques du couscous cuit au moyen du viscoélastographe Chopin. *Industries alimentaires et agricoles* 114, 844-847.

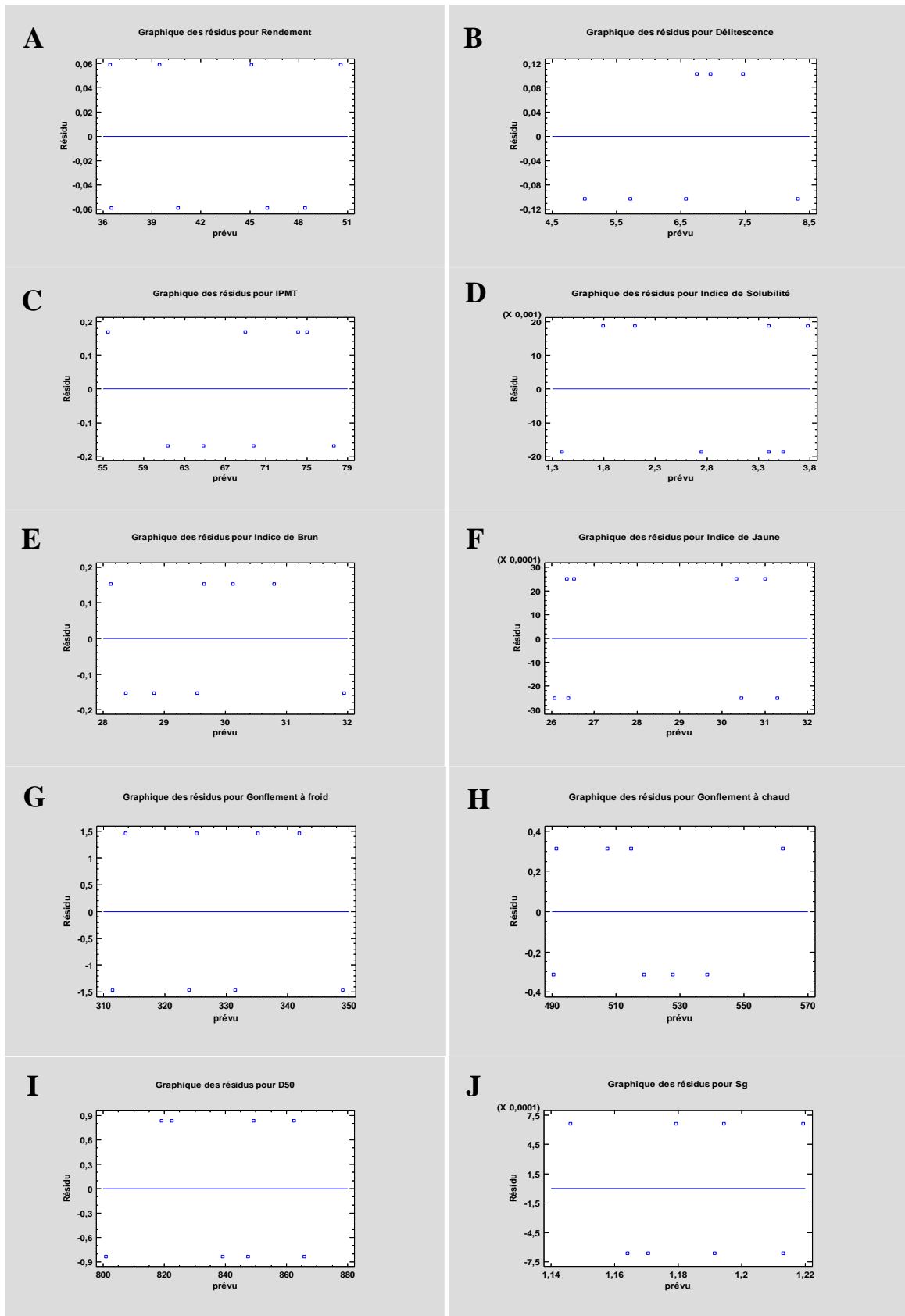
Yousfi, L., 2002. Influence des conditions de fabrication sur la qualité du couscous industriel et artisanal. *Université Mentouri Constantine, Algérie*, p. 140.

ANNEXE A



Diagrammes de Pareto des réponses : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J)

Annexe B



Présentation des résidus en fonction des valeurs prédites pour : Rendement (A), Délitescence (B), IPMT (C), Indice de solubilité (D), Indice de brun (E), Indice de jaune (F), Gonflement à froid (G), Gonflement à chaud (H), D50 (I) et Sg (J)

ANNEXE C : Etude des corrélations

	Rendement en couscous	Rendement en semoule non agglomérées	Rendement en grumeaux	D50 couscous	Sg couscous	IJ couscous	G25	G100	Délitescence	IPMT	IGG CNP	IGG CP	IGG CS
GI semoule	-	0,73	-0,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GI/PM semoule	-	0,70	-0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GI/GI+GS semoule	-	0,51	-0,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Teneurs en protéines semoules	-	-0,66	0,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GS CNP	0,68	-0,65		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GI CNP	-	0,84	-0,65	-	-	-	-	-	-	-	0,72	-	-
GI/GI+GS CNP	-0,46	0,82	-0,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GI CS	-	-	-	0,6	-	-	0,68	0,73	-0,47	-	-	-	0,7
GI/GI+GS CS	-	-	-	0,77	-	-	0,54	0,72	-0,37	0,4	-	-	-
GI CP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7	-
IGG CNP	-0,65	0,81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IGG CS	-	-	-	0,82	-	-	0,68	-	-	0,6	-	-	-
D50 semoule	-	0,73	0,79	-0,78	0,51	-	-	-	-0,87	-	-	-	-
Teneur en lipides	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,9	-0,72	-	-	-
IJ semoule	-	-	-	-	-	0,96	-	-	-	-	-	-	-
D50 couscous	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,85	-	-	-

Résumé

Ce travail consiste à étudier l'incidence de l'hydratation (taux : 34%, 36%, 38% et température : 0°C, 22°C, 40°C de l'eau d'hydratation) des semoules de blé dur sur la qualité technologique du couscous, l'optimisation des conditions d'hydratation ainsi que les modifications biochimiques des protéines au cours de la fabrication du couscous. Deux semoules commerciales sont utilisées (semoule courante, semoule extra).

A la lumière des résultats obtenus, il ressort que les facteurs étudiés ont un effet sur les rendements du roulage, sur la qualité des couscous à l'état secs ainsi que sur la qualité culinaire des couscous. La diminution de la température de l'eau d'hydratation jusqu'à 0°C a eu un effet bénéfique sur les rendements et sur la coloration des couscous. Ces produits présentent une meilleure qualité culinaire. L'évolution de la D50 en fonction de la température de l'eau d'hydratation dépend de la semoule mise en œuvre. De plus, le roulage avec de l'eau à 22°C permet d'obtenir des couscous de granulométrie plus homogène.

L'accroissement du taux d'hydratation augmente les rendements en couscous et conduit à l'obtention des produits de granulométrie plus élevée et plus homogène, alors que la coloration se trouve dégrader. Avec l'augmentation du taux d'hydratation, la capacité d'hydratation des couscous s'améliore et la délitescence diminue, tandis que le collant et l'indice de solubilité des produits augmentent.

L'optimisation des conditions d'hydratation des semoules de blé dur fait ressortir que les valeurs des facteurs qui permettent d'optimiser le rendement et la qualité du couscous sont : un taux d'hydratation de 37,595% et une température de 4,443°C.

Lors de l'hydratation de la semoule et le roulage du couscous les protéines subissent certaines modifications, les teneurs des PM et des GI diminuent alors que les teneurs des GS augmentent. Ces modifications biochimiques jouent un rôle dans la formulation des granules de couscous et dans les rendements du roulage. En revanche, après la précuisson et le séchage du couscous, les teneurs des PM et des GS diminuent tandis que les teneurs des GI augmentent. L'évolution des teneurs en PM, GS et GI et les valeurs des IGG des couscous en fonction du taux d'hydratation et de la température de l'eau d'hydratation dépend du traitement.

L'analyse par électrophorèse des protéines des couscous montre que les traitements du couscous (hydratation/roulage, précuisson et séchage) et les conditions d'hydratation étudiées, ne fait pas ressortir des modifications significatives au niveau des sous-unités observables dans les différents produits. Les mêmes sous-unités de hauts poids moléculaires et de poids moléculaires moyens, caractéristiques des différentes protéines du gluten, apparaissent en effet tant chez les semoules témoins qu'après traitement.

Mots clés : semoule de blé dur, taux d'hydratation, température de l'eau d'hydratation, couscous, protéines, optimisation des conditions d'hydratation.

Summary

This work consists in studying the incidence of hydration (rate: 34%, 36%, 38% and temperature: 0°C, 22°C, 40°C of water of hydration) in durum wheat semolina on the technological quality of couscous, the optimization of hydration conditions as well as the biochemical modifications of proteins during the manufacture of couscous. Two commercial semolina are used (common semolina, extra semolina).

In the light of the results obtained, it appears that the factors studied have an effect on the rolling yields, on the quality of dry couscous as well as on the culinary quality of the couscous. The decrease in the temperature of the water of hydration up to 0°C had a beneficial effect on the yields and the coloration of the couscous. These products have a better culinary quality. The evolution of the D50 as a function of the temperature of the water of hydration depends on the semolina used. In addition, running with water at 22°C makes it possible to obtain couscous with a more homogeneous particle size distribution.

The increase in the hydration rate increases the yields of couscous and leads to obtaining the products of higher and more homogeneous particle size, while the coloring is degraded. As the hydration rate increases, the hydration capacity of the couscous improves and the disintegration decreases, while the pantyose and the solubility index of the products increase. The optimization of hydration conditions for durum wheat semolina shows that the values of the factors that make it possible to optimize the yield and quality of couscous are: a moisture content of 37,595% and a temperature of 4,443°C.

During the semolina hydration and the running of the couscous the proteins undergo certain modifications, the contents of the PM and the GI decrease while the contents of the GS increase. These biochemical changes play a role in the formulation of the couscous granules and in the rolling yields. On the other hand, after precooking and drying couscous, PM and GS levels decrease while GI levels increase. The evolution of PM, GS and GI contents and IGG values of couscous according to the hydration rate and the temperature of the water of hydration depends on the treatment.

The electrophoresis analysis of the couscous proteins shows that the treatments of the couscous (hydration / rolling, precooking and drying) and hydration conditions studied, do not show significant changes in the subunits observed in the various products . The same subunits of high molecular weight and average molecular weight, characteristic of the different proteins of gluten, appear indeed in both control semolina and after treatment.

Key words: durum wheat semolina, hydration rate, hydration water temperature, couscous, proteins, optimization of hydration conditions.

ملخص

يكمن هذا العمل في دراسة تأثير الترطيب (معدل الترطيب 34 % و 36% و 38% ودرجة الحرارة الماء الترطيب : 0 °C ، 22 °C ، 40°C) للسميد القمح الصلب على الجودة التكنولوجية للكسكس، وتعيين ظروف الترطيب المثلى وكذلك التغييرات البيوكيميائية للبروتينات أثناء تصنيع الكسكس. وتستخدم نوعان من السميد التجاري (سميد ممتاز ، سميد عادي). في ضوء النتائج التي تم الحصول عليها، يبدو أن العوامل المدروسة لها تأثير على المردود ، على نوعية الكسكس الجاف وكذلك على نوعية طهي الكسكس.

ان الانخفاض في درجة حرارة الماء حتى 0 °C له تأثير مفيد على مردود ولون الكسكس. هذه المنتجات لديها أفضل جودة الطهي. تطور D50 حسب درجة حرارة ماء الترطيب يعتمد على السميد المستخدم. وبالإضافة إلى ذلك، استعمال الماء في 22 °C لصنع الكسكس يعطي منتج له حبات متجانسة. وزيادة في معدل الترطيب يزيد من مردود الكسكس ويؤدي إلى الحصول على منتجات أخشن وأكثر تجانسا، في حين أن اللون يتدهور. كما ان زيادة معدل الترطيب، يحسن انتفاخ الكسكس ويقلل من التفكك، في حين تلاحظ الكسكس ومؤشر الذوبان للمنتجات تزيد. ظروف الترطيب المثلى لسميد القمح الصلب التي تسمح بتحسين المردود ونوعية الكسكس هي: معدل الماء 37.595% ودرجة حرارة الماء 4.443 °C.

خلال ترطيب السميد و تصنيع الكسكس البروتينات تخضع لبعض التغييرات، PM و GI تنخفض في حين أن GS تزيد هذه التغييرات البيوكيميائية تلعب دورا في صياغة حبيبات الكسكس وفي مردود. من ناحية أخرى، بعد الطهي على البخار والتجفيف الكسكس، PM و GS تنخفض بينما GI تزيد. تطور PM ، GS و GI و IGG وفقا لمعدل الترطيب ودرجة حرارة الماء يعتمد على مرحلة التصنيع.

تحليل البروتينات الكسكس عن طريق *électrophorèse* يدل على أن الكسكس في مختلف مراحل التصنيع والظروف ترطيب ، لا تؤدي الى تغييرات في البروتينات.

الكلمات الأساسية: سميد القمح الصلب، معدل الترطيب، درجة حرارة ماء الترطيب، الكسكس، البروتينات، تحسين ظروف الترطيب.