

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Frères Mentouri Constantine 1 (U.F.M.C. 1)



Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires
(I.N.A.T.A.A.)



N° d'ordre : 47/DS/2020

N° de série : 04/INA/2020

Thèse de Doctorat en Sciences
Spécialité : Sciences Alimentaires

Présentée par :

M. Loucif CHEMACHE

Enquête sur le couscous et effets de quelques paramètres sur sa qualité et sur le phénomène d'agglomération humide de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de farines sans gluten (maïs, sarrasin, quinoa, amarante et manioc)

Soutenue le 23 septembre 2020 devant le jury composé de :

Président	M. BENLARIBI M.	Professeur, Fac. S.N.V., Université frères Mentouri Constantine 1
Directeur de thèse	M. NAMOUNE H.	Professeur, I.N.A.T.A.A., Université frères Mentouri Constantine 1
Co-Directeur de thèse	M. OULAHNA D.	A. Professeur, HDR, Ecole des Mines d'Albi, France
Examineurs	M. AMIALI M.	Professeur, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, Alger
	M. KATI D.	M.C.A, Université Abderrahmane Mira, Bejaia
	M. CHAALAL M.	M.C.A, I.N.A.T.A.A., Université frères Mentouri Constantine 1

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon Directeur de thèse **Pr Hacène Namoune**, chef de l'équipe « Céréales et Produits Céréaliés » (C.P.C.) du Laboratoire de Recherche en Nutrition et Technologie Alimentaire (L.N.T.A.) à l'I.N.A.T.A.A. Je le remercie pour m'avoir fait confiance et d'avoir cru en moi pour mener à bien ce projet de thèse. Je le remercie également pour la direction de ce travail, pour ses orientations tout au long des années de réalisation de cette thèse, pour sa disponibilité, son objectivité et sa rigueur scientifique.

Je tiens à remercier **Pr Driss Oulahna**, pour m'avoir accueilli gracieusement au sein des laboratoires du centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement RAPSODEE, IMT Mines Albi, France. Je le remercie pour avoir mis à ma disposition tous les moyens qui ont fait de mon séjour à Albi une expérience efficace, agréable et inoubliable. Je le remercie également pour la codirection de ce travail pour lequel il a consacré beaucoup de temps aux discussions scientifiques et amicales et pour ses encouragements.

Mes remerciements vont aussi au **Pr Mustapha Belaribi** de m'avoir accordé l'immense honneur de présider le jury de cette thèse et également aux **Pr Malek Amiali**, **Dr Djamel Kati** et **Dr Makhlouf Chaalal** qui m'ont fait le grand honneur d'examiner et de juger ce travail.

Je souhaite par ailleurs remercier **Pr Ange Nzihou**, Directeur du centre de recherche RAPSODEE, IMT Mines Albi, France où j'ai pu bénéficier de très bonnes conditions de travail, tout aussi bien matérielles que scientifiques. J'exprime mes remerciements à **Dr Olivier Lecoq** pour son implication et ses aides précieuses, comme je remercie **Dr Romain Sescousse** et l'ensemble du personnel de RAPSODEE en particulier **M. Laurent Devriendt** et **M^{me} Sylvie Delconfeto**.

Je remercie très sincèrement **Pr Abdelghani Boudjellal**, Directeur de l'I.N.A.T.A.A. Je le remercie pour tous les moyens mis à disposition, pour ses encouragements et ses incitations qui ont contribué à la finalisation ce travail. Je remercie tous mes amis, mes collègues et l'ensemble du personnel de l'I.N.A.T.A.A.

Je remercie **Dr Mohamed Gagaoua**, Teagasc Ashtown Food Research Centre, Ashtown, Dublin, Ireland. Je le remercie pour son soutien et ses encouragements au cours de toutes les années de thèse. Je le remercie également pour ses précieuses contributions scientifiques qui m'ont beaucoup aidé pour mener ce travail.

Enfin, je suis très reconnaissant envers mon épouse et collègue de travail **Mme Farida Kehal**, je la remercie pour son affection, son soutien, ces encouragements permanents et sa contribution scientifique précieuse qui m'ont aidé à la réalisation de cette thèse.

A la mémoire de ma mère.

A mon père, qui a tout fait pour me voir réussir. Qu'il trouve ici l'expression de mon éternelle reconnaissance.

A ma très chère Farida, mon épouse, qui par son sacrifice, son amour et ses encouragements a été à l'origine de la réussite de mon projet de thèse.

A mes enfants Mehenni, Arwa et Thiziri, même s'ils ne m'ont pas toujours simplifié la tâche, ils m'ont permis par la force des choses de relativiser et d'oublier, une fois rentrée, les soucis du travail.

A mes frères, à mes sœurs et à leur famille

Table des matières

Liste des figures
 Liste des tableaux
 Liste des abréviations et des symboles
 Liste des annexes
 Liste des publications et des communications

Synthèse bibliographique

Introduction..... 1

Chapitre I : Couscous 4

1. Origine et étymologie du couscous 4

2. Définition du couscous 4

3. Fabrication du couscous 5

3.1. Fabrication artisanale 5

3.1.1. Hydratation et roulage 5

3.1.2. Calibrage et recyclage 6

3.1.3. Précuisson..... 6

3.1.4. Séchage..... 6

3.2. Fabrication industrielle..... 6

3.2.1. Agglomération humide..... 7

3.2.2. Traitement hydro-thermique 8

3.2.3. Séchage..... 8

4. Qualité du couscous 8

4.1. Qualité culinaire 8

4.1.1. Indice de gonflement 8

4.1.2. Indice de prise en masse 8

4.1.3. Tenue à la cuisson 9

4.1.4. Temps de cuisson 9

4.2. Qualité technologique 9

4.2.1. Granulométrie..... 9

4.2.2. Masse volumique..... 9

4.2.3. Forme des particules..... 10

4.3. Qualité organoleptique 10

Chapitre II : Agglomération humide des poudres amylacées..... 11

1. Caractéristiques des poudres amylacées 11

1.1. Granulométrie..... 11

1.2. Masse volumique..... 12

1.3. Porosité..... 14

1.4. Ecoulement..... 14

1.5. Forme et état de surface des particules..... 14

2. Agglomération humide..... 15

2.1. Procédés de granulation 15

2.1.1. Granulation en malaxeur 18

2.1.2. Granulation en lit fluidisé..... 18

2.2. Etats de saturation des grains et suivi par mesure du couple de torsion 18

2.3. Etapes de granulation	21
2.3.1. Mouillage nucléation.....	22
2.3.2. Croissance et densification.....	22
2.3.3. Rupture/attrition	22
2.4. Forces inter-granulaires.....	22
2.4.1. Ponts solides.....	23
2.4.2. Ponts liquides mobiles.....	23
2.4.3. Ponts liquides non mobiles.....	23
2.4.4. Forces de Van der Waals.....	23
2.4.5. Forces électrostatiques	23
2.4.6. Forces d'interactions	23
2.5. Facteurs influençant l'agglomération humide.....	23
2.5.1. Taux d'humidité des poudres	23
2.5.2. Granulométrie des poudres.....	24
2.5.3. Viscosité du liquide de mouillage	24
2.5.4. Tension de surface du liquide de mouillage.....	25
2.5.5. Taille de la goutte.....	26
2.6. Origine des semoules et farines agglomérées en couscous	28
2.6.1. Céréales	28
2.6.2. Légumineuses.....	29
2.6.3. Autres origines	30

Matériel et méthodes

Partie I. Enquête sur le couscous artisanal.....	34
1. Lieu de l'enquête.....	34
2. Population cible.....	34
3. Description du questionnaire.....	34
3.1. Identité de la personne enquêtée	35
3.2. Informations générales	35
3.3. Etapes de la fabrication du couscous artisanal	36
3.4. Préparation et consommation du couscous	36
4. Traitement des résultats et analyses statistiques.....	37
Partie II. Etude de quelques pratiques adoptées dans la fabrication artisanale du couscous	38
1. Présentation des sections d'étude	38
1.1. Etude de l'effet de l'incorporation de la farine de blé tendre.....	38
1.2. Etude de l'effet de l'ajout de sel de table (NaCl) dans l'eau d'hydratation	38
1.3. Etude de la granulabilité en couscous des farines sans gluten	38
2. Caractérisation des matières premières	39
2.1. Caractérisation des propriétés physiques	40
2.1.1. Taille et distribution de taille	40
2.1.2. Masses volumiques	40
2.1.3. Observations microscopiques.....	41
2.2. Teneur en eau	42
2.3. Propriétés rhéologiques des semoules et farines	42
2.3.1. Indice de Carr et Ratio d'Hausner.....	42

2.3.2. Angle de talus et écoulement massique.....	42
2.4. Propriétés d'hydratation	43
2.4.1. Isothermes de sorption	43
2.4.2. Test de gonflement dans l'eau.....	44
3. Détermination de l'aptitude à l'agglomération	44
4. Essais d'agglomération à l'échelle laboratoire.....	47
4.1. Conduite de l'agglomération	47
4.2. Caractérisation des agglomérats humides	48
4.2.1. Distribution granulométrique	49
4.2.2. Teneur en eau par classes d'agglomérats	49
4.2.3. Masses volumiques	49
5. Essais d'agglomération à l'échelle artisanale.....	50
5.1. Fabrication artisanale du couscous.....	50
5.2. Evaluation de la qualité technologique des couscous secs.....	51
5.2.1. Calcul du rendement au roulage.....	51
5.2.2. Détermination de la teneur en eau.....	51
5.2.3. Mesure des masses volumiques.....	51
5.2.4. Analyses granulométriques	51
5.3. Evaluation des propriétés culinaires des couscous secs	52
5.3.1. Indice de gonflement.....	52
5.3.2. Degré de délitescence.....	52
5.3.3. Temps de cuisson	53
5.3.4. Détermination des indices de gain en masse et en volume	53
5.4. Evaluation de la qualité sensorielle	53
5.4.1. Test de classement par rang.....	54
5.4.2. Test hédonique	55
6. Traitement des résultats et analyses statistiques.....	55

Résultats et discussion

Partie I. Enquête sur la fabrication, la préparation et la consommation du couscous . 57

1. Présentation des personnes enquêtées	57
2. Informations générales	58
3. Etapes de la fabrication du couscous artisanal	59
3.1. Préparation et classification de la semoule	61
3.2. Hydratation.....	61
3.3. Roulage calibrage.....	62
3.3.1. Etape de grenaison	62
3.3.2. Etape de mise en forme	63
3.3.3. Etape de finition	64
3.4. Précuisson.....	65
3.5. Séchage.....	66
3.6. Conditionnement et stockage	66
4. Préparation du couscous.....	67
4.1. Conduite de la réhydratation du couscous sec	67
4.2. Cuisson du couscous réhydraté	67
5. Consommation du couscous.....	68

Partie II. Etude de quelques pratiques adoptées durant la fabrication artisanale du couscous	71
1. Caractéristiques des matières premières.....	71
1.1. Caractéristiques physiques	71
1.2. Microstructure	73
1.3. Propriétés d'hydratation	74
2. Effet de l'incorporation de la farine de blé tendre.....	78
2.1. Propriétés rhéologiques d'agglomération.....	78
2.2. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus à l'échelle laboratoire	81
2.3. Variabilité des agglomérats humides suite à l'ajout de FBT	86
3. Effet de l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation	88
3.1. Propriétés rhéologiques d'agglomération.....	88
3.2. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus à l'échelle laboratoire	92
3.3. Variabilité des agglomérats humides obtenus avec de l'eau salée.....	97
4. Granulabilité des farines sans gluten en couscous	99
4.1. Propriétés intrinsèques des farines	99
4.2. Taille et distribution de taille des farines	99
4.3. Microstructure des particules de farines.....	101
4.4. Propriétés d'hydratation	102
4.4.1. Indice de gonflement	102
4.4.2. Cinétique de prise en eau	103
4.5. Propriétés rhéologiques d'agglomération.....	105
4.6. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus à l'échelle laboratoire	110
4.7. Variabilité des agglomérats humides sans gluten	115
4.8. Propriétés des couscous secs sans gluten obtenus à l'échelle artisanale.....	118
4.8.1. Propriétés physiques.....	118
4.8.2. Propriétés culinaires	122
4.8.3. Propriétés sensorielles	129
4.8.4. Variabilité des couscous secs sans gluten	131
Conclusion et perspectives	134
Références bibliographiques	137
Annexes	
Résumés	

Liste des figures

Figure 1. Schéma de fabrication industrielle du couscous	7
Figure 2. Microstructure du grain de couscous en microscope électronique environnemental	10
Figure 3. Porosité et différentes formes de pores	14
Figure 4. Granulateurs de poudres : (a) tambour rotatif, (b) lit fluidisé, (c) mélangeur granulateur, (d) lit fluidisé avec agitation mécanique	16
Figure 5. Différents états de saturation des grains par le liquide d'hydratation : (a) état pendulaire, (b) funiculaire, (c) état capillaire, (d) état de goutte.....	19
Figure 6. Courbe de consommation de la puissance électrique en fonction du temps ou du liquide de mouillage	20
Figure 7. Schématisation de l'agglomération humide de la semoule de blé dur en couscous	21
Figure 8. Mécanismes d'agglomération : (a) approche classique, (b) approche naissante	22
Figure 9. Etapes de la nucléation.....	26
Figure 10. Mécanisme de nucléation en fonction de la taille des gouttes. a) Par distribution, b) Par immersion	27
Figure 11. Paramètres influençant les étapes de la granulation humide.....	27
Figure 12. Schéma du dispositif expérimental des différentes parties de la thèse	33
Figure 13. Répartition géographique des wilayas ciblées pour le déroulement de l'enquête .	34
Figure 14. Voluméno-mètre Tap-Tap ERWEKA®	41
Figure 15. Schéma d'un système dynamique de sorption de vapeur (DVS).....	44
Figure 16. Mixer Torque Rheometer (MTR-Caleva®)	46
Figure 17. Schéma d'une enceinte du malaxeur MTR-Caleva® : (A) arbre d'entraînement principal, (B) arbre secondaire, (C) plan de cisaillement.....	46
Figure 18. Mélangeur-granulateur Mi-Pro® Pro-C-Ept.....	47
Figure 19. Représentation schématique du bol du mélangeur-granulateur Mi-Pro®	47
Figure 20. Diagramme de fabrication artisanale du couscous identifié à travers l'enquête menée auprès de 517 ménages du Nord-Est de l'Algérie.....	60
Figure 21. (I) Rôle de la semoule fine dans le mécanisme d'agglomération, (II) Rôle de l'amidon de maïs/farine de blé tendre dans l'étape de finition du couscous artisanal	63
Figure 22. Photographies des plats de couscous montrant les différents types de viande, de produits ethniques à base de viande et quelques légumes utilisés pour la préparation ou la consommation de couscous avec (A) viande rouge ovine ou bovine, (B) viande de poulet, (C)	

guedid, (D) poisson, (E) douara, (F) bouzelouf, (G) merguez, (H) sucre et œufs durs, et (I) lait fermenté appelé (<i>l'ben</i> ou <i>ighi</i> en Berbère).	69
Figure 23. Photographies du mesfouf préparées avec (A) de la fève et du petit pois ou (B) avec des fruits comme des raisins secs et des dattes	69
Figure 24. Distributions granulométriques de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre	73
Figure 25. Microstructure des particules natives (I) et leur état de surface (II) par microscopie électronique environnemental (ESEM) des particules élémentaires de la semoule de blé dur (SBD), de la farine d'orge (FO) et de la farine de blé tendre (FBT).....	74
Figure 26. Indice de gonflement dans l'eau de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre	75
Figure 27. Isothermes de sorption de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre à 25 °C	76
Figure 28. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre à une humidité relative de 95 % pendant l'absorption de la vapeur d'eau par la semoule de blé dur, la farine d'orge et la farine de blé tendre	77
Figure 29. Evolution du couple moyen de torsion en fonction du ratio de mouillage (L/S) pendant l'agglomération humide des mélanges de la farine de blé tendre (I) avec la semoule de blé dur (SBD/FBT) et (II) avec la farine d'orge (FO/FBT)	80
Figure 30. Distributions granulométriques (a) SBD-FBT, (b) FO-FBT et teneur en eau des fractions humides (c) SBD-FBT, (d) FO-FBT des agglomérats obtenus par le granulateur Mi-Pro®	83
Figure 31. Analyse en composantes principales de la variabilité des agglomérats humides obtenus par agglomération humide de la SBD et de la FO additionnées de la FBT dans le granulateur Mi-Pro® en fonction de leurs caractéristiques, (A) projection des variables sur le cercle des corrélations et (B) représentation des individus et de leurs caractéristiques. Abréviations (L/S : ratio d'hydratation, Rdt : rendement d'agglomération, H % : teneur en eau, d ₅₀ : diamètre médian, pa : densité aérée, pt : densité tassée, FP : fraction pâteuse, CP : couple de torsion).....	87
Figure 32. Evolution du couple moyen de torsion en fonction du ratio de mouillage (L/S) pendant l'agglomération humide de la semoule de blé dur (I) et de la farine d'orge (II) à différentes concentrations en sel (NaCl) dans l'eau d'hydratation	91

Figure 33. Distributions granulométriques (a) SBD-NaCl, (b) FO-NaCl et teneur en eau des fractions humides (c) SBD- NaCl, (d) FO-NaCl des agglomérats obtenus par le granulateur Mi-Pro®	96
Figure 34. Analyse en composantes principales de la variabilité des agglomérats humides obtenus par agglomération de la SBD et de la FO avec une eau à différentes concentrations en sel dans le granulateur Mi-Pro® en fonction de leurs caractéristiques. (A) projection des variables sur le cercle des corrélations et (B) représentation des individus et de leurs caractéristiques. Abréviations (L/S : ratio d'hydratation, Rdt : rendement d'agglomération, H % : teneur en eau, d ₅₀ : diamètre médian, ρ _a : densité aérée, ρ _t : densité tassée, FP : fraction pâteuse, CP : couple de torsion)	98
Figure 35. Distribution de taille des farines sans gluten étudiées	99
Figure 36. Microstructure (I) et état de surface (II) par microscopie électronique environnemental (ESEM) des particules élémentaires des farines sans gluten ; (A) maïs, (B) manioc, (C) amarante, (D) sarrasin et (E) quinoa	102
Figure 37. Indice de gonflement des différentes farines sans gluten	103
Figure 38. Isothermes de sorption des farines sans gluten à 25 °C	104
Figure 39. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre à une humidité relative de 95 % pendant l'absorption de la vapeur d'eau par les farines.....	105
Figure 40. Evolution du couple moyen de torsion en fonction du ratio de mouillage (L/S) pendant l'agglomération humide des farines sans gluten.....	107
Figure 41. Agglomérats humides issus des farines sans gluten (A : maïs, B : amarante, C : sarrasin et D : quinoa) obtenus par le granulateur Mi-Pro®	111
Figure 42. Teneur en eau des fractions granulométriques constituant les agglomérats humides issus de la granulation humide des farines sans gluten dans le granulateur Mi-Pro®	114
Figure 43. Distributions granulométriques des agglomérats humides issus de la granulation humide des différentes farines sans gluten dans le granulateur Mi-Pro®	114
Figure 44. Analyse en composantes principales de la variabilité des agglomérats humides sans gluten. (A) Projection des variables sur le cercle des corrélations et (B) représentation des individus et de leurs caractéristiques. Abréviations : Composition biochimique (Pr : protéines, Am : amidon, Li : lipides, Fi : fibre), propriétés d'hydratation (L/S _{opt} : ratio d'hydratation optimal, CT : couple de torsion), caractéristiques des agglomérats humides (Rdt A : rendement d'agglomération, H %-AH : teneur en eau, d ₅₀ -AH : diamètre médian, ρ _a -AH : densité aérée, ρ _t -AH : densité tassée, FP : fraction pâteuse)	117
Figure 45. Photographies des couscous sans gluten et du témoin (blé dur)	118

Figure 46. Evolution des indices de gonflement dans l'eau à 25 °C (a) et à 95 °C (b) des couscous fabriqués en fonction du temps. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur	124
Figure 47. Degré de délitescence des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)	125
Figure 48. Temps de cuisson des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)	127
Figure 49. Indices de gain en masse et en volume des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)	128
Figure 50. Profils sensoriels des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)	131
Figure 51. Analyse en composantes principales de la variabilité des couscous sec sans gluten. A) cercle des corrélations des paramètres caractérisant les différents couscous secs et leur matières premières. B) Biplot de la variabilité des couscous sans gluten. C) Classification hiérarchique descendante des couscous sans gluten. Abréviations : Composition biochimique (Pr : protéines, Am : amidon, Li : lipides, Fi : fibre), propriétés d'hydratation (L/Sop : ratio d'hydratation optimal, CT : couple de torsion), caractéristiques des couscous secs (HR-C : teneur en eau, Rdt-C : rendement au roulage, d ₅₀ -C : diamètre médian, pa-C : densité aérée, pt-C : densité tassée, IC-C : indice de Carr, IH-C : indice d'Hausner, G-25°C : gonflement à 25°C, G-95°C : gonflement à 95°C, DD : degré de délitescence, TCmin : temps de cuisson minimal, TCopt : temps de cuisson optimal, TCmax : temps de cuisson maximal, IGM : indice de gain en masse, IGV : indice de gain en volume, Cl : couleur, Od : odeur, Co : collant, Fe : fermeté et AG : appréciation globale)	133

Liste des tableaux

Tableau 1. Granulométrie de quelques semoules et farines issues de quelques origines botaniques.....	12
Tableau 2. Présentation de quelques paramètres de caractérisation des granules.....	13
Tableau 3. Aperçu des technologies de granulation humide.....	17
Tableau 4. Composition biochimique des farines et de la semoule étudiées (g/100 g m.s.)...	39
Tableau 5. Caractérisation de l'écoulement selon l'indice de Carr et le ratio d'Hausner.....	42
Tableau 6. Caractérisation de l'écoulement selon l'angle de repos	43
Tableau 7. Paramètres opératoires de la granulation sur le mélangeur-granulateur Mi-pro® .	48
Tableau 8. Caractéristiques et structure sociodémographique de la population enquêtée (N _{total} =517)	58
Tableau 9. Propriétés intrinsèques de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre	72
Tableau 10. Paramètres caractérisant les agglomérats humides obtenus après l'ajout de la FBT à la SBD et à la FO.....	85
Tableau 11. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus après l'ajout du sel (NaCl).	95
Tableau 12. Propriétés intrinsèques des farines sans gluten	100
Tableau 13. Identification des différents états de structure en fonction du ratio d'hydratation et du couple de torsion moyen correspondant.....	108
Tableau 14. Caractéristiques des agglomérats humides issus des farines sans gluten : la teneur en eau, le rendement d'agglomération, le diamètre médian et les densités aérée et tassée....	113
Tableau 15. Caractéristiques physiques des couscous secs sans gluten obtenus par le procédé artisanal	121
Tableau 16. Résultats du test de classement par rang des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)	129

Liste des abréviations et symboles

Abréviations

ANOVA	Analysis of variance
ACP	Analyse en composantes principales
AG	Appréciation globale
Am	Amidon
AT	Angle de talus
CA	Couscous d'amarante
CBD	Couscous de blé dur
Cdr	Cendres
Cl	Couleur
CM	Couscous de maïs
Co	Collant
CQ	Couscous de quinoa
CS	Couscous de sarrasin
CT	Couple de torsion
DD	Degré de délitescence
DG	Dispersion granulométrique
DVS	Dynamic vapor sorption
Ec	Ecoulement massique
FA	Farine d'amarante
FBT	Farine de blé tendre
Fe	Fermeté
Fi	Fibres
FMc	Farine de manioc
FMs	Farine de maïs
FO	Farine d'orge
FP	Fraction pâteuse
FQ	Farine de quinoa
FS	Farine de sarrasin
H %	Teneur en eau
IC	Indice de Carr

IG	Indice de gonflement
IGM	Indice de gain en masse
IGV	Indice de gain en volume
IH	Indice d'Hausner
L/S	Ratio d'hydratation
Li	Lipides
m.s.	Matière sèche
MTR	Mixer torque rheometer
Od	Odeur
Pr	Protéines
RD	Ratio de densification
Rdt	Rendement d'agglomération
SBD	Semoule de blé dur
SF	Semoule fine
SG	Semoule grosse
TCmax	Temps de cuisson maximal
TCmin	Temps de cuisson minimal
TCopt	Temps de cuisson optimal

Symboles

d_{10}	Diamètre correspondant à une fréquence cumulée de 10 %
d_{50}	Diamètre correspondant à une fréquence cumulée de 50 % (diamètre médian)
d_{90}	Diamètre correspondant à une fréquence cumulée de 90 %
ρ	Masse volumique vraie
ρ_a	Masse volumique aérée
ρ_t	Masse volumique tassée
ε_a	Porosité aérée
ε_t	Porosité tassée

Liste des annexes

Annexe 1.	Questionnaire de la fabrication, de la préparation et de consommation du couscous artisanal.....	I
Annexe 2.	Bulletin du test de classement par rang.....	VII
Annexe 3.	Différences des sommes de classement par rang absolu critiques pour les comparaisons de «tous les traitements» à un seuil de signification de 1 %.....	VIII
Annexe 4.	Bulletin pour le test hédonique avec un barème de notation allant de 1 à 10.....	IX
Annexe 5.	Corrélations entre les variables et les facteurs de l'ACP montrant l'effet de la FBT.....	X
Annexe 6.	Matrice de corrélation de Pearson (n) entre le taux d'ajout de la farine de blé tendre (FBT) sur les propriétés d'hydratation (L/S : ratio d'hydratation et CP : couple de torsion) et les caractéristiques des agglomérats humides (H % : teneur en eau, Rdt : rendement d'agglomération, d ₅₀ : diamètre médian, FP : fraction pâteuse, ρ _a : densité aérée et ρ _t : densité tassée).....	XI
Annexe 7.	Corrélations entre les variables et les facteurs de l'ACP montrant l'effet du sel.....	XII
Annexe 8.	Matrice de corrélation de Pearson (n) entre la concentration du sel dans l'eau d'hydratation sur les propriétés d'hydratation (L/S : ratio d'hydratation et CP : couple de torsion) et les caractéristiques des agglomérats humides (H % : teneur en eau, Rdt : rendement d'agglomération, d ₅₀ : diamètre médian, FP : fraction pâteuse, ρ _a : densité aérée et ρ _t : densité tassée).....	XII
Annexe 9.	Corrélations entre les variables et les facteurs F1 et F2 de l'ACP pour les agglomérats humides sans gluten.....	XIV
Annexe10.	Matrice de corrélation entre les caractéristiques des agglomérats humides sans gluten et celles de leurs matières premières.....	XV
Annexe 11.	Corrélations entre les variables et les facteurs F1 et F2 pour les couscous sec sans gluten.....	XVI
Annexe 12.	Matrice de corrélation entre les caractéristiques des couscous secs sans gluten et celles de leurs matières premières.....	XVII

Liste des publications et des communications

1. Publications scientifiques

Chemache L., Kehal F., Namoune H., Chaalal M. & Gagaoua M. (2018). Couscous: Ethnic making and consumption patterns in the Northeast of Algeria. *Journal of Ethnic Foods* 5(3), 211-219.

Chemache L., Lecoq O., Namoune H. & Oulahna D. (2019). Agglomeration properties of gluten-free flours under water addition and shearing conditions. *LWT-Journal of food science and technology* 110, 40-47.

2. Communications affichées

Mezroua E., **Chemache L.** & Namoune H. (2012). Effet des caractéristiques physicochimiques du couscous sur sa qualité culinaire. 1^{ier} congrès international de la société algérienne de nutrition CI-SAN, 5-6 décembre, Oran-Algérie.

Mezroua E., **Chemache L.** & Namoune H. (2012). Effet de la granulométrie du couscous sur sa qualité culinaire. 1^{ier} congrès international de la société algérienne de nutrition CI-SAN, 5-6 décembre, Oran-Algérie.

Chemache L., Kehal F., Okki A., Bensid A., Ghennam I., Kehal M., Boudjeaada S. & Namoune H. (2014). Enquête sur la fabrication, la préparation et la consommation du couscous artisanal dans l'Est de l'Algérie. Séminaire international sur les sciences alimentaires SISA, 14-16 octobre, INATAA, UMC1, Constantine-Algérie.

Chemache L., Lecoq O., Namoune H. & Oulahna D. (2017). Effet du NaCl et de la farine de blé tendre sur les propriétés de granulation humide de la semoule de blé dur et de la farine d'orge. 3^{ème} congrès international CI-SAN, 28-30 novembre, Constantine-Algérie.

Introduction

Introduction

Fabriqué à partir de la semoule de blé dur et d'eau, le couscous est aux Maghrébins ce que les pâtes sont aux Italiens et le riz aux Chinois. En effet, dans les dernières années, le Maghreb uni (L'Algérie, le Maroc, la Mauritanie et la Tunisie) a bien tenté de déposer une candidature conjointe à l'Unesco pour que le plat soit inscrit à la liste du patrimoine mondial de l'humanité (Hammami et Sissons, 2020).

La transformation des particules natives des semoules en couscous englobe un ensemble de traitements physiques tels que le mélange et le roulage et des traitements hydro-thermiques comme l'hydratation, la cuisson à la vapeur et le séchage. Les modifications physicochimiques des matières tout au long de l'agglomération humide confèrent au couscous ses qualités technologiques et organoleptiques (Galiba *et al.*, 1987; Guezlane *et al.*, 1998a).

Les consommateurs apprécient le couscous parce que, tout comme les pâtes, il s'agit d'un produit bien adapté à la vie moderne, doté de remarquables propriétés telles que la faible teneur en matières grasses et d'un indice glycémique faible (D'Egidio et Pagani, 2010). Un couscous dit de bonne qualité est un couscous avec des particules de tailles uniformes, sans odeurs inhabituelles et de couleur jaune ambrée (Ounane *et al.*, 2006 ; Abecassis *et al.*, 2012). Après la cuisson, les grains du couscous doivent être tendres, bien individualisés sans se déliter avec une capacité d'absorption d'eau très élevée (Debbouz *et al.*, 1994; Debbouz et Donnelly, 1996). A sa consommation, le couscous ne doit apparaître asséché ni donner l'impression d'un produit en manque de sauce ou de cuisson (Yousfi, 2002). Cette qualité dépend de la matière première (Debbouz, 1992; Debbouz *et al.*, 1994; Hebrard, 2002; Doukani, 2015; Messia *et al.*, 2019), du procédé de fabrication (Debbouz et Donnelly, 1996) et des conditions de préparation du plat à la consommation (Mezroua, 2011).

A l'origine, le couscous est fabriqué artisanalement, puis son industrialisation a commencé après l'introduction de minoteries en Algérie par les établissements Maison Ricci à Blida en 1853 et Ferrero à Alger en 1907 (Béji-Bécheur *et al.*, 2014). Cela indique que le couscous demeure depuis très longtemps un produit qui intéresse une technologie, qui tente bien que mal à imiter la fabrication traditionnelle et préserver la réputation de cet aliment auprès de ses consommateurs.

En Algérie, le couscous roulé maison dit « traditionnel » commence à être délaissé au profit du couscous dit « industriel ». Cela est dû à plusieurs raisons sociologiques et économiques à savoir

l'activité des femmes en dehors du foyer, la non-maîtrise du geste traditionnel, la disponibilité sur le marché du couscous industriel et le côté pratique des aliments préfabriqués, etc. Néanmoins et malgré les progrès obtenus par les industriels, la reproduction de la qualité du couscous traditionnel reste un défi à soulever pour les technologues. Ceci peut être remarqué dans le fait que la tendance à la consommation du couscous industriel est toujours accompagnée par sa disqualification par rapport au couscous artisanal (le fait maison est mieux) (Beji-Becheur et Ozcaglar-Toulouse, 2008 ; Barboff, 2010). Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de cette disqualification, à savoir la méconnaissance des critères d'appréciation de la valeur couscoussière qui ne sont pas suffisamment définis et mis au point, l'instabilité des matières premières et l'inadaptation des différentes opérations unitaires de la fabrication industrielle du couscous.

À ce jour, les connaissances actuelles associées à la fabrication du couscous, aux matières premières mises en œuvre et à sa qualité sont toujours très limitées, et ceci est en raison de la complexité des propriétés physicochimiques des poudres amyliques et du mécanisme de genèse du grain du couscous. Cet aspect fait l'objet de quelques travaux de recherche qui discutent des problématiques et des perspectives du domaine. Les uns se sont intéressés à étudier les conditions de fabrication (Debbouz et Donnelly, 1996; Guezlane *et al.*, 1998a; Guezlane *et al.*, 1998b; Hebrard, 2002; Yousfi, 2002 ; Bellocq *et al.*, 2017 ; Bellocq *et al.*, 2018a). Les autres se sont penchés vers la qualité et la mise au point des méthodes qui la caractérisent (Guezlane et Abecassis, 1991 ; Yettou, 1998), et encore d'autres ont touché aux qualités des semoules et farines transformées en couscous (Ounane *et al.*, 2006 ; Demir *et al.*, 2010; Oulahna *et al.*, 2012; Doukani, 2015; Demir et Demir, 2016; Bellocq *et al.*, 2018b; Messia *et al.*, 2019).

La reproductibilité de la bonne qualité du fameux couscous traditionnel par le procédé industriel nécessite une compréhension très approfondie du procédé artisanal. Dans la littérature, très peu de travaux ont tenté d'expliquer les différentes pratiques adoptées durant la fabrication artisanale du couscous afin de mieux comprendre les mécanismes responsables de cette différence de qualité.

C'est dans cette optique que s'insère ce travail de thèse de doctorat et les objectifs visés sont les suivants :

- Apporter de nouvelles connaissances plus approfondies sur le couscous artisanal à travers une enquête préalable sur terrain au Nord-Est de l'Algérie sur sa fabrication, sa préparation et sa consommation.

- Etudier l'impact sur le comportement rhéologique des semoules pendant l'agglomération humide selon certaines pratiques adoptées lors de la fabrication artisanale, à savoir l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation et l'utilisation de la farine de blé tendre.
- Etudier l'impact des pratiques précédentes sur les propriétés des agglomérats fabriqués.
- Analyser la faisabilité de transformation en couscous d'autres poudres amylacées (farines sans gluten) autres que la semoule de blé dur à travers leurs propriétés rhéologiques d'agglomération et les caractéristiques de leur couscous fini.

Ce manuscrit de thèse est présenté en trois parties principales encadrées par une introduction et une conclusion générales :

- La première partie présente une revue de littérature scindée en deux chapitres ; le premier est consacré au couscous. Après une revue sur l'aspect socioculturel du couscous, les procédés de sa fabrication sont présentés et les paramètres de qualité sont décrits. Le deuxième chapitre est dédié aux procédés de l'agglomération humide, où les caractéristiques des poudres sont présentées et le phénomène d'agglomération est détaillé en présentant les différents procédés, les étapes de granulation et les facteurs influençant l'agglomération humide.
- La deuxième partie décrit le dispositif expérimental en présentant les matériels et les méthodes mis en œuvre pour la réalisation de notre étude.
- La troisième partie regroupe la présentation des différents résultats obtenus au cours des différentes parties d'étude, leurs analyses et leurs interprétations. Cette partie est organisée en quatre volets ; présentation et discussion des résultats de l'enquête, de l'effet de l'ajout de la farine de blé tendre, de l'effet de la salinité de l'eau d'hydratation et de la faisabilité de fabrication du couscous avec des farines sans gluten.

Synthèse bibliographique

Chapitre I

Couscous

Chapitre I : Couscous

1. Origine et étymologie du couscous

Le couscous est un produit simple par excellence, il représente la denrée de base de l'Afrique du Nord et plat national dans plusieurs pays (Algérie, Tunisie, Libye, Maroc). Il trouve ses racines chez les Berbères (Hubert, 1995). Les plus anciennes traces des instruments de fabrication (sorte de couscoussier) ont été trouvées en Kabylie. Au sens strict, le couscous est la graine obtenue par agglomération de semoule de blé, fine, moyenne ou grosse en présence d'eau. Le couscous est souvent accompagné d'un bouillon de légumes dénommé « *marka* » (Guezlane et Senator, 1985).

L'étymologie du couscous serait à trouver dans le bruit de la préparation de la graine de couscous lorsqu'elle est passée au tamis, un bruit qui fait « *keskes* » (Gobert, 1940). Selon une étymologie avancée, le mot couscous provient du berbère (ⵜⴰⵙⴰⵏⵏⵉⵜ) dont la forme de base est "*seksu*" (Chaker, 2013) qui désigne à la fois la semoule de blé dur et le plat populaire dont elle est l'ingrédient de base. L'historien culinaire Lucie Bolens décrit des pots primitifs de couscous trouvés dans des tombes qui remontent au règne du roi berbère Massinissa c'est-à-dire entre 238 et 149 Av. J.C. (Samrakandi, 2006). Le mot couscous aurait donné le nom au plat cuisiné ainsi qu'à l'ustensile dans lequel est cuite la graine à la vapeur au-dessus d'une marmite (*borma*) sur laquelle il s'ajuste : l'ensemble forme le couscoussier (Beji-Becheur et Ozcaglar-Toulouse, 2008).

En Algérie, les types de couscous sont très diversifiés et le couscous est considéré comme une origine de la vie et le plat emblématique pour tous les algériens. En effet, il existe autant de variantes que de régions, de saisons et des occasions. Il est appelé *seksu* en Kabylie, *taberbouchet* dans les Aurès, *tâ'am* (qui signifie l'aliment en arabe) à Ouled-Naïl, *lem'hawar* à Mila et *naâma* à Constantine.

2. Définition du couscous

Plusieurs définitions ont été établies pour la présentation du couscous. Boudreau et Ménard (1992) et Feillet (2000) ont défini le couscous comme une semoule de blé dur étuvée et agglomérée en granules de 1 à 2 millimètres de diamètre par procédé industriel ou artisanal et généralement servi avec des légumes, de la viande ou du poisson, et une sauce relevée. Kaup et Walker (1986) ont également défini le couscous comme granulats obtenus par malaxage de la

semoule à la main en présence d'eau dans de larges récipients jusqu'à ce que la teneur en eau souhaitée soit atteinte.

Une autre définition citée par [Yousfi \(2002\)](#) indique que le couscous est une pâte alimentaire granuleuse préparée à partir d'agglomération de semoule additionnée d'eau, ensuite précuite à la vapeur puis séchée, par la suite elle est conditionnée et stockée. Pour sa consommation, il suffit de le réhydrater avant d'être cuit deux à trois fois à la vapeur.

En se référant au *Codex alimentarius* ([Codex Stan 202-1995](#)), le couscous est un produit destiné à la consommation humaine directe et composé de semoule de blé dur (*Triticum durum*) dont les éléments sont agglomérés en ajoutant de l'eau potable et qui a été soumis à des traitements physiques tels que la cuisson et le séchage.

3. Fabrication du couscous

3.1. Fabrication artisanale

Depuis des temps très anciens, le couscous est fabriqué manuellement. Cependant, dans les grandes villes et dans les foyers où la femme travaille, le couscous industriel est de plus en plus consommé. La façon avec laquelle le couscous artisanal est fabriqué diffère d'un pays à autre, d'une région à une autre et voir même d'une personne à une autre. En dépit des différences, beaucoup de ressemblances ont été recensées ([Abecassis et al., 2012](#); [Guezlane et Senator, 1985](#)). Cela a permis d'énumérer des étapes pouvant décrire les différentes étapes menant aux granules de couscous artisanal qui feront l'objet de la première partie dans ce travail de thèse.

3.1.1. Hydratation et roulage

Avant de procéder à l'hydratation, la fabricante commence par la préparation de la semoule. Cette opération comprend la classification en deux classes granulométriques ; la fraction grosse et la fraction fine.

L'hydratation consiste en un ajout d'un volume du liquide d'hydratation qui est en général l'eau potable douce ou salée au fur et à mesure que le roulage se réalise ([Debbouz et Donnelly, 1996](#)). Avec la pomme des mains et doigts demi fichés, le roulage s'effectue en mouvement circulaires avec une légère pression. Cette opération permet une distribution homogène et optimale de l'eau d'hydratation dans le lit de la semoule. De temps en temps, de petites quantités de la fraction fine sont ajoutées. A ce stade, les particules primaires commencent à adhérer les unes aux autres et la grenaison prend place pour donner des agglomérats de semoule ([Yousfi, 2002](#)).

3.1.2. Calibrage et recyclage

Selon [Kaup et Walker \(1986\)](#) et [Yousfi \(2002\)](#), les agglomérats de semoule obtenus lors du roulage subissent un tamisage qui permet la séparation des grosses particules. Ensuite, un autre tamis avec des ouvertures réduites est utilisé pour la calibration à la taille voulue. Pour en finir avec cette étape, un tamisage s'effectue à l'aide d'un tamis à mailles plus fines dans le but de récupérer les particules de couscous humide et éliminer les particules de la semoule non agglomérée.

3.1.3. Précuisson

Après calibration, le couscous humide est précuit à la vapeur d'eau sur un couscoussier ([Galiba et al., 1987](#)). Selon [Guezlane et al. \(1998b\)](#), la précuisson permet d'éviter l'agglomération des particules de couscous au cours de la réhydratation. Il a été également rapporté par [Yousfi \(2002\)](#) et [Abecassis et al. \(2012\)](#) que la précuisson stabilise l'aspect de la forme des grains par gélatinisation au moins partielle de l'amidon et par coagulation des protéines. La précuisson peut être un moyen préventif contre l'altération du couscous sec grâce à la réduction de la charge microbienne par élimination de certaines bactéries en forme végétative ([Ziane et al., 2018](#)) et l'inactivation des enzymes ([Yousfi, 2002](#)).

3.1.4. Séchage

Le couscous précuit est étalé sur un drap en couche mince de 1 à 2 millimètres ([Galiba et al., 1988](#)). Pour obtenir un couscous avec une teneur eau finale d'environ 13 %, le séchage s'effectue à l'air libre par exposition au soleil ou à l'ombre ([Kaup et Walker, 1986](#); [Yousfi, 2002](#)) pendant 48 heures ([Debbouz et Donnelly, 1996](#)). Entre temps, le lit de couscous est retourné de temps en temps pour un séchage homogène.

3.2. Fabrication industrielle

De préparation artisanale, manuelle, la graine devient semi-industrielle avec l'introduction de minoteries en Algérie (établissements Maison Ricci à Blida en 1853 ou Ferrero à Alger) ([Beji-Becheur et Ozcaglar-Toulouse, 2008](#)). Selon les écrits de [Kaup et Walker \(1986\)](#), [Quaglia \(1988\)](#) et [Méot \(2006\)](#), le design des équipements industriels pour la production de couscous est basé sur les mêmes techniques que celles utilisées dans les pratiques artisanales. Trois grandes étapes peuvent décrire le procédé industriel pour la fabrication du couscous comme indiqué dans la figure 1.

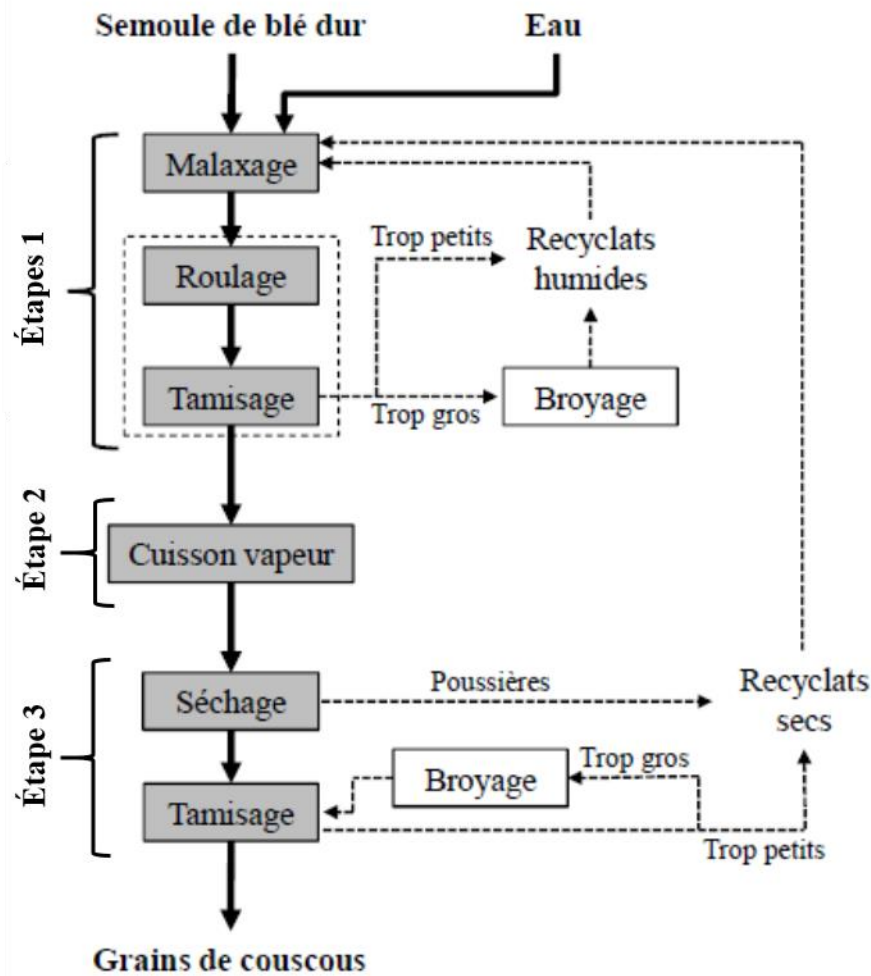


Figure 1. Schéma de fabrication industrielle du couscous (Abecassis et al., 2012)

3.2.1. Agglomération humide

Dans un premier équipement de malaxage, la semoule est mise en contact avec l'eau d'hydratation afin d'initier la formation des agglomérats par agglomération humide. Selon Guezlane (1993), le volume de l'eau ajoutée ne doit pas dépasser la limite qui entraîne la formation d'une pâte (état de goutte). Il a été mentionné dans la littérature que des taux d'hydratation de 34 % (Méot, 2006) et de 35 % (Hebrard et al., 2001) sont nécessaires pour permettre une bonne agglomération. Ensuite, le roulage des agglomérats humide peut se faire à l'aide de deux équipements ; soit avec plansichter (succession verticale de tamis vibrants), soit avec un tambour rotatif. A ce stade, les agglomérats de couscous humide présentent des formes sphériques et subissent un tamisage en fonction de leur taille pour ne retenir que la fraction correspondant au calibre commercial (Mandato, 2012).

3.2.2. Traitement hydro-thermique

Le traitement hydro-thermique consiste en une cuisson à la vapeur d'eau à 180 °C pendant 8 minutes (Mezroua, 2011). Ce traitement permet de gélatiniser l'amidon afin de rendre le produit digestible et de lui conférer sa capacité de gonflement lors de son utilisation finale. La cuisson contribue également à renforcer la cohésion interne des agglomérats et leur résistance mécanique (Guezlane, 1998b).

3.2.3. Séchage

Cette opération consiste en une élimination d'une certaine teneur en eau jusqu'aux environs de 13 %. En baissant l'activité de l'eau des grains du couscous, la durée de vie du produit augmente et les propriétés organoleptiques et microbiologiques sont conservées. Les grains du couscous sec sont tamisés pour un classement granulométrique selon les différents types du couscous commercial. Il a été mentionné par Hebrard (2002) que trois types de couscous sont à considérer ; le couscous gros (2 à 2,5 mm), le couscous moyen (1 à 2 mm), et le couscous fin (0,65 à 1 mm).

4. Qualité du couscous

4.1. Qualité culinaire

L'aspect culinaire de couscous est similaire à celui des pâtes alimentaires sauf en ce qui concerne le mode de cuisson. Les caractéristiques culinaires des pâtes alimentaires sont : le gonflement, la texture, l'état de désintégration ou de surface et les différents temps de cuisson, (minimal, optimal et maximal) (Feillet, 1986). Les travaux de Guezlane et Senator (1985) indiquent que la qualité culinaire du couscous peut être évaluée par la détermination de l'indice de gonflement G1 et G2 et la tenue à la cuisson qui peut être traduite par la délitescence et le collant.

4.1.1. Indice de gonflement

Il correspond à la capacité d'absorption d'eau pendant la cuisson (Feillet, 1986; Yettou *et al.*, 1997). Il est mesuré par les changements du volume apparent d'un échantillon de couscous une fois immergé dans l'eau froide (G1 à 25°C) ou chaude (G2 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).

4.1.2. Indice de prise en masse

La prise en masse représente le phénomène de la formation des amas des grains de couscous après la réhydratation (Guezlane, 1993; Ounane *et al.*, 2006). L'apparition de gros agglomérats

dépassant 3 millimètres de diamètre indique que le couscous prend masse. Les faibles valeurs de l'indice de prise en masse peuvent indiquer la bonne qualité du couscous (Yettou *et al.*, 1997).

4.1.3. Tenue à la cuisson

Ce paramètre représente le degré de la désintégration des grains de couscous durant la cuisson (Yettou, 1998). Pour qualifier un couscous de haute qualité, le degré de désintégration doit être le plus faible possible (Ounane *et al.*, 2006). Les pertes à la cuisson peuvent être influencées par la granulométrie des grains du couscous (Yettou, 1998), et les caractéristiques physicochimiques de la semoule à base de laquelle le couscous est fabriqué, à savoir la granulométrie (Tigroudja et Bendjoudiouadda, 1998), le taux d'extraction (Idir, 2000) et la teneur en lipides polaires (Ounane *et al.*, 2006).

4.1.4. Temps de cuisson

Selon les travaux de Yousfi (2002), la cuisson à la vapeur d'eau du couscous réhydraté comprend deux cuissons consécutives ; la première et la deuxième cuisson. Les temps de cuisson du couscous peuvent être présentés comme suit :

- Le temps minimal : il est déterminé visuellement, quand le flux de vapeur apparaît à la surface du couscous.
- Le temps optimal : il est obtenu en additionnant les deux temps de cuisson (première et deuxième cuisson). A ce temps, les grains de couscous sont individualisés et présentent une certaine tendreté.
- Le temps maximal : il est obtenu lorsque la surcuisson est atteinte. A ce stade, il y'a formation des mottes suite à une saturation à la vapeur d'eau des surfaces des grains de couscous tout en développant l'aspect collant entre les grains.

4.2. Qualité technologique

4.2.1. Granulométrie

Selon le *Codex alimentarius* (Codex Stan 202-1995), la granulométrie est un facteur de qualité du couscous sec, elle doit être comprise entre un minimum de 630 µm et maximum de 2000 µm avec une tolérance de 6 % et elle est déterminée par tamisage (Guezlane et Senator, 1985). Le couscous industriel compte trois types selon la taille des grains ; le couscous gros (2 à 2,5 mm), le couscous moyen (1 à 2 mm), et le couscous fin (0,65 à 1 mm) (Hebrard, 2002).

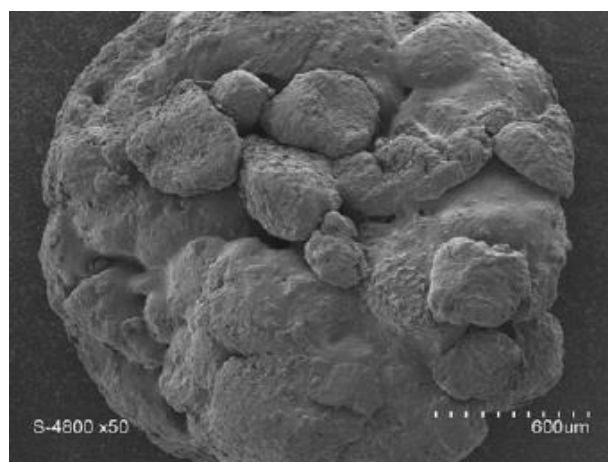
4.2.2. Masse volumique

Appelée aussi la densité volumique de masse, c'est une grandeur qui caractérise la masse d'un matériau (ex. couscous) par le volume qu'il occupe. Guezlane (1993) et Debbouz et Donnelly

(1996) ont caractérisé la masse volumique du couscous par remplissage d'une éprouvette graduée. En se référant à la norme AFNOR (NF T51-042:1967), la masse volumique d'une poudre céréalière peut être caractérisée par la masse volumique aérée et la masse volumique tassée qui permette l'évaluation des propriétés d'écoulement par l'indice de Carr et le ratio d'Hausner (Carr, 1965 ; Amidon *et al.*, 1999).

4.2.3. Forme des particules

La forme de la graine du couscous pourra présenter un critère important pour l'évaluation de la qualité du couscous. Le grain de couscous sec apparaît comme une grosse particule agglomérée par association de plusieurs particules élémentaires de semoule plus ou moins fondues (Figure 2) (Abecassis *et al.*, 2012). Cet indice de qualité semble être influencé par le mode de fabrication. Guezlane *et al.* (1986) et Debbouz et Donnelly (1996) ont rapporté que les grains de couscous artisanal présentent une granulométrie homogène et des formes arrondies, alors que ceux qui sont issus du procédé industriel ont une granulométrie et des formes hétérogènes. Par ailleurs, Kaup et Walker (1986) ont indiqué qu'un panel de dégustation a préféré la forme du couscous artisanal et la juge meilleure que celle du couscous industriel.



*Figure 2. Microstructure du grain de couscous en microscopie électronique environnemental (Abecassis *et al.*, 2012)*

4.3. Qualité organoleptique

Les attributs sensoriels du couscous peuvent être évalués par un panel de dégustateurs en analysant plusieurs paramètres ; l'apparence, la sensation dans la bouche, la saveur, l'odeur et l'acceptabilité générale (Kaup et Walker, 1986 ; Debbouz *et al.*, 1994; Debbouz et Donnelly, 1996).

Chapitre II

Agglomération humide des
poudres amylacées

Chapitre II : Agglomération humide des poudres amylacées

1. Caractéristiques des poudres amylacées

Les poudres amylacées peuvent être caractérisées par des paramètres physiques tels que la granulométrie, la porosité, la morphologie, l'état de surface et les paramètres mécaniques et électrostatiques (Tableau 2). L'ensemble de ces paramètres affecte largement la cinétique et le mécanisme de l'agglomération par voie humide.

1.1. Granulométrie

Selon le *Codex alimentarius*, certaines semoules et farines présentent des granulométries différentes selon l'origine botanique (Tableau 1).

La taille et la distribution de taille définissent la granulométrie des particules élémentaires des matériaux pulvérulents. Dans la plupart des cas, les grains des poudres amylacées présentent des formes et des tailles très hétérogènes et dès que la forme s'éloigne d'une sphère, l'analyse granulométrique devient plus complexe. Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre pour la détermination des caractéristiques granulométriques des poudres et le choix de leurs applications dépend du domaine de taille et de la solubilité des particules. Le tamisage par voie sèche est une technique qui sépare les particules par vibration à travers une série de tamis, la sédimentation est une autre technique qui utilise les propriétés de déplacement des particules solides dans un liquide et la technique de la diffraction de la lumière laser se base sur les phénomènes d'interaction de la lumière avec les particules (Merkus, 2009a).

La distribution granulométrique peut être présentée sous forme d'un tableau ou d'un histogramme. Selon la technique employée, la fraction de chaque classe peut s'exprimer en nombre, en surface ou en masse (ou volume). De même, chacune de ces distributions peut être présentée en cumulé retenu (plus grand que) ou passant (moins grand que). Par ailleurs, en supposant que la forme des particules est indépendante de leur taille, on peut passer d'une présentation à une autre.

Une fois la distribution de taille des particules établie, on peut en déduire les diamètres caractéristiques tels que le diamètre médian " d_{50} " qui est un diamètre correspondant à une fréquence cumulée de 50 % et les diamètres " d_{90} " et " d_{10} " correspondent à la dimension pour laquelle il y a 90 % et 10 % des particules de taille inférieure à d_{90} et d_{10} respectivement. L'étalement de la distribution de taille peut être caractérisé par $(d_{90} - d_{10})/d_{50}$ (Merkus, 2009b).

Tableau 1. Granulométrie de quelques semoules et farines issues de quelques origines botaniques

Semoules et farines	Limite maximale de granulométrie	Source
Semoule de blé dur	Max : 79 % doit passer au travers d'un tamis en textile synthétique ou d'une gaze de soie de 315 μm .	(Codex Stan 178-1991)
Farine de blé tendre	98 % ou plus de la farine doit passer au travers d'un tamis de 212 μm .	(Codex Stan 152-1985)
Farine de maïs	95 % ou plus de la farine complète de maïs doit passer au travers d'un tamis de 1700 μm , 45 % ou plus doit passer au travers d'un tamis de 710 μm et 35 % ou moins de la farine complète de maïs doit passer au travers d'un tamis de 212 μm .	(Codex Stan 154-1985)
Farine de manioc	Farine fine : Min : 90 % doit passer au travers d'un tamis de 600 μm . Farine à gros grains : Min : 90 % doit passer au travers d'un tamis de 1200 μm .	(Codex Stan 176-1989)

1.2. Masse volumique

Une masse volumique d'un objet est la masse de son unité de volume. Cette définition semble avoir des ambiguïtés du fait que les poudres et les milieux granulaires présentent des porosités qui peuvent se manifester à différentes échelles. Par conséquent, pour un matériau pulvérulent on peut distinguer plusieurs masses volumiques (Saleh et Guigon, 2009a).

- La masse volumique aérée (ρ_a) : elle est donnée par le rapport de la masse de poudre en vrac et le volume apparent qu'occupe le lit de poudre en tenant compte de la porosité intra et inter-particulaire.
- La masse volumique tassée (ρ_t) : elle est mesurée après un tassement souvent obtenu par secousses successives (tapotements ou vibrations) d'une éprouvette graduée, jusqu'à volume constant, l'amplitude et la fréquence de secousses successives étant standardisées.
- La masse volumique vraie (ρ_v) : il s'agit de la masse volumique réelle, elle est déterminée par des méthodes pycnométriques qui consistent à mesurer la masse et le volume de la poudre. Le volume peut être mesuré en utilisant un fluide capable de pénétrer à l'intérieur de la couche de particules pour remplir toute la porosité (interne et externe). La méthode employée pour les poudres est la pycnométrie à hélium.

Tableau 2. Présentation de quelques paramètres de caractérisation des granules

Caractéristiques des granules	Outils de caractérisation	Principe	Equation	Références
Caractéristiques physiques de la porosité et de densité.	i. Indice de Carr (IC) et ratio d'Hausner (RH). ii. Porosité aérée (ε_a) et porosité tassée (ε_t).	i. L'IC et le RH renseignent sur l'écoulement des poudres. ii. Utilisé pour trouver la porosité relative. La porosité tassée indique la compression nécessaire pour éliminer le vide entre les particules d'un lit de poudre.	$IC = (\rho_t - \rho_a)/\rho_t$ $IH = \rho_t/\rho_a$ $\varepsilon_a = (1 - \frac{\rho_a}{\rho_v})$ $\varepsilon_t = (1 - \frac{\rho_t}{\rho_v})$	(Carr, 1965; Ramachandran <i>et al.</i> , 2008; Drumm <i>et al.</i> , 2009)
Résistance des granules.	i. Essai d'écrasement direct. ii. Friabilité des granules.	i. Enregistre la résistance à l'écrasement des granules. ii. Méthode d'attrition utilisant un friabilisateur pour mesurer la friabilité des granules.		(Gold <i>et al.</i> , 1966; Harwood et Pilpel, 1968; Ganderton et Hunter, 1971). (Mehta <i>et al.</i> , 1978; Rumpf, 1962; Serpelloni et Boonaert, 1996)
Taille et distribution de taille.	i. Peut être mesurée par tamisage, diffraction laser ou microscope optique. ii. Morphologie des granules.	i. La taille est exprimée par les diamètres caractéristiques (d_{10} , d_{50} et d_{90}) et la dispersion granulométrique (DG). ii. Les descripteurs de forme sont : sphéricité, circularité, élongation et convexité.	$DG = (d_{90} - d_{10})/d_{50}$	(Bocquet <i>et al.</i> , 2002; Saleh et Guigon, 2009a; Saad <i>et al.</i> , 2011a). (Bouwman <i>et al.</i> , 2004; Almeida-Prieto <i>et al.</i> , 2007)
Teneur en eau	Humidité relative et activité de l'eau.	Mesure de la teneur en eau totale et détermination la teneur en eau à l'état libre.		(Chowhan, 1979; Hegedüs et Pintye-Hódi, 2007)

1.3. Porosité

Dans le procédé de l'agglomération humide des matériaux granulaires et en particulier les semoules, les farines et toutes les poudres amylacées, la porosité se montre comme un paramètre en lien direct avec le mécanisme et la cinétique de la granulation (Roman-Gutierrez *et al.*, 2003 ; Rajniak *et al.*, 2007).

Le rapport entre le volume des espaces et le volume total du matériau définit la porosité. Dans un lit de poudre, deux types de porosité peuvent être distingués ; la porosité inter-particulaire qui se présente par l'espace vide entre les particules voisines et la porosité intra-particulaire qui représente l'espace vide dans les particules ou agglomérats. Si les pores sont interconnectés entre eux, ils donneront une porosité dite continue, si les pores débouchent à l'extérieur on aura une porosité ouverte et s'ils sont à l'intérieur de la particule, ils donneront une porosité fermée (Figure 3) (Saleh et Guigon, 2009a).

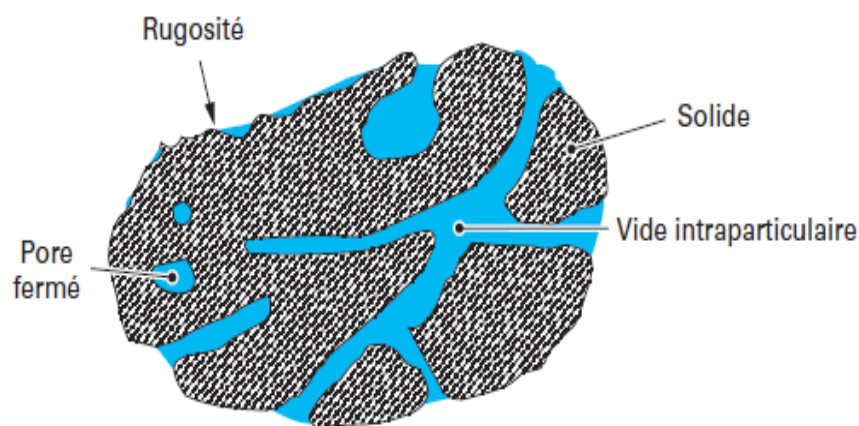


Figure 3. Porosité et différentes formes de pores (Saleh et Guigon, 2009a)

1.4. Ecoulement

La coulabilité des semoules et farines présente une importance dans le domaine de granulation humide compte tenu du nombre d'opérations unitaires qui nécessitent la mise en mouvement des particules de poudre : stockage/déstockage, transfert, séparation, classement/tamissage, granulation, mélange et conditionnement. La coulabilité peut être évaluée par le calcul des indices de Carr (IC) et d'Hausner (IH) à partir de la masse volumique aérée et tassée.

1.5. Forme et état de surface des particules

La forme et l'état de surface sont d'autres paramètres physiques qui servent à caractériser les particules de semoules et farines et à déterminer leurs propriétés technologiques et fonctionnelles. Au cours de l'agglomération, les forces de friction sont en partie liées aux forces inter-granulaires qui dépendent de la porosité inter-particulaire. Cette dernière est largement

influencée par la morphologie des particules élémentaires. Les semoules et farines sont constituées de particules présentant des hétérogénéités de formes et de taille (sphérique, angulaire, aiguille, filiforme, fractale, etc.). À défaut de pouvoir traiter l'information à l'échelle de chaque particule individuelle, il convient de définir tout d'abord des paramètres pertinents pour exprimer la taille et la forme des particules (diamètre équivalent, facteur de forme, sphéricité, convexité, etc.) puis de recourir aux analyses statistiques pour déterminer les caractéristiques moyennes de la population à partir de leur distribution (Saleh et Guigon, 2009a).

Dans l'étude menée par Saad *et al.* (2011a), les facteurs de forme étudiés pour la détermination de la forme des particules de semoule de blé dur et de farine de blé tendre sont la circularité, l'élongation, la convexité et la compaction. Les résultats ont démontré que plus les particules sont fines, plus la forme est régulière.

En général, la surface des particules de semoules et farines peut être facettée mais non pas lisse. Des aspérités et des sillons sont souvent notés. Cette irrégularité donne une rugosité qui influence la distance minimale de contact entre deux particules et modifie l'aire de contact et donc, les forces cohésives (Bocquet *et al.*, 2002).

2. Agglomération humide

Plusieurs denrées alimentaires se présentent à l'état de particules natives divisées, utilisées en l'état ou transformées sous forme de nouvelles particules plus grossières. Cette transformation peut avoir lieu grâce à l'agglomération ou appelée aussi la granulation qui est selon Ennis et Litster (1997) ; Benali *et al.* (2009) et Hapgood et Khanmohammadi (2009), une opération unitaire permettant de rassembler les particules d'un matériel pulvérulent en agglomérats où les graines d'origine peuvent encore être identifiées. Les agglomérats obtenus à la fin de la granulation devront présenter des propriétés techno-fonctionnelles meilleures et satisfaire les attentes des consommateurs (Dacanal et Menegalli, 2010; Palzer, 2011; Kumar *et al.*, 2013; Suresh *et al.*, 2017).

2.1. Procédés de granulation

Les granulateurs instrumentés utilisés pour l'agglomération humide peuvent être classés en fonction du taux de cisaillement qu'ils peuvent générer (Figure 4). Les mélangeurs connus sous l'appellation « high-shear mixers » sont des réacteurs équipés d'agitateurs à mouvements rapides donnant des taux de cisaillement élevés. Des taux de cisaillement intermédiaires peuvent être donnés par des assiettes rotatives ou des tambours tournants. Enfin, le lit fluidisé

qui est un système à faible taux de cisaillement (Castel, 1996). Le tableau 3 regroupe les différents granulateurs, leurs caractéristiques, avantages et inconvénients.

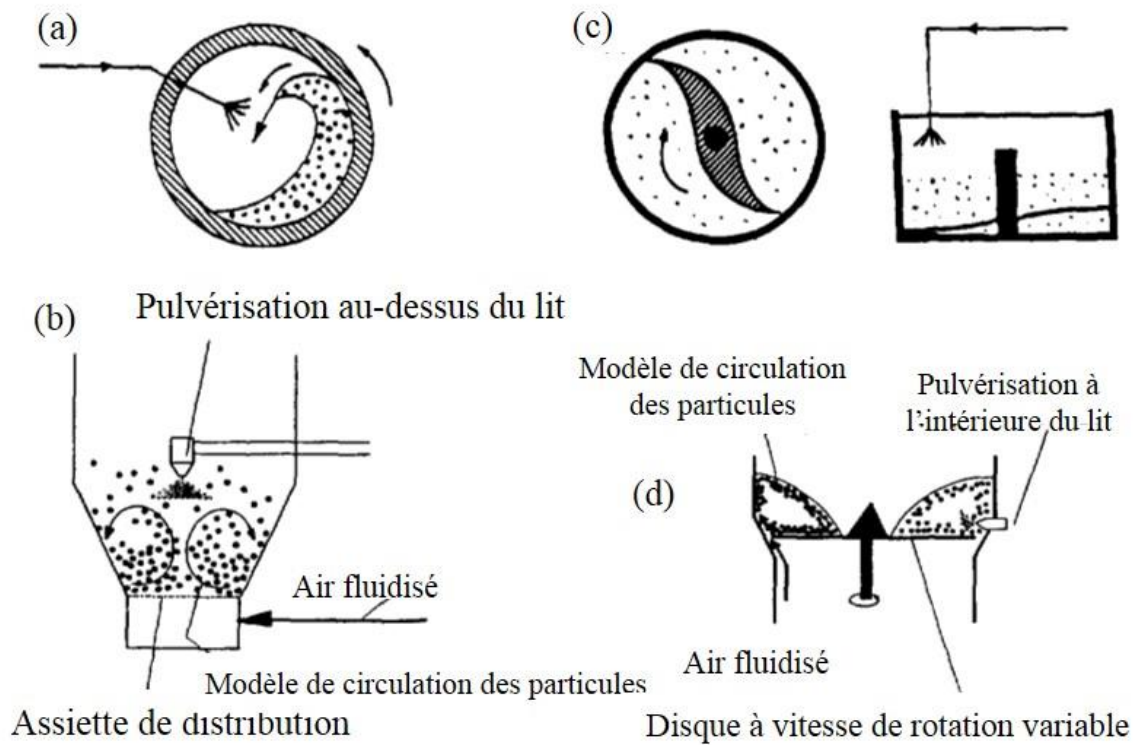


Figure 4. *Granulateurs de poudres : (a) tambour rotatif, (b) lit fluidisé, (c) mélangeur granulateur, (d) lit fluidisé avec agitation mécanique (Tardos et al., 1997)*

Tableau 3. Aperçu des technologies de granulation humide

Granulateur	Paramètres de conception	Caractéristiques des granules	Applications	Avantages	Inconvénients	Références
Granulateurs à faibles et fortes forces de cisaillement (batch)	La géométrie du bol de granulation. La forme, la taille et la vitesse de la pale et de l'émoteur	Faibles forces de cisaillement : granules poreux et moins compactes. Fortes forces de cisaillement : granules compactes, friables et moins poreux.	Faibles forces de cisaillement : matériaux sensibles à la chaleur. Fortes forces de cisaillement : matériaux cohésifs.	Temps de granulation court. Faible demande d'énergie et du liquide d'hydratation.	Temps de séjour réduit, possibilité de dégradation des matériaux sensibles aux chocs mécaniques et thermiques. Ne convient pas aux matériaux sensibles à l'humidité.	(Knight et al., 2001; Oulahna et al., 2003; Kumaresan et Joshi, 2006; Cavinato et al., 2011; Shi et al., 2011; Cai et al., 2013; Wade et al., 2014)
Lit fluidisé	Dimensions et emplacement des buses. Géométrie du bol de granulation. Température de l'air de fluidisation et positionnement des plaques de distribution de l'air.	Granules très poreux, moins denses et plus compressibles.	Matériaux sensibles à la chaleur.	Faible consommation d'énergie lors du séchage des matériaux.	Faible reproductibilité et nécessite des volumes élevés en liquide d'hydratation.	(Kristensen et Schaefer, 1987; Horisawa et al., 2000; Gao et al., 2002; Teunou et Poncelet, 2002; Watano et al., 2003; Li et al., 2012; Morin et Briens, 2014;)
Granulation par pulvérisation	Temps de séjour, vitesse de fluidisation, vitesse de pulvérisation et propriétés du liant.	Matériaux à propriétés d'écoulement très faibles.		Même équipement pour la granulation et le séchage.	Difficultés de séparation des particules séchées et humides. Grande consommation d'énergie.	(Stahl, 2004; Vervae et Remon, 2005; Dadkhah et Tsotsas, 2014)
Granulateur à double vis	Forme de la vis, propriétés du liant, temps de séjour et température du cylindre. Répartition des zones d'hydratation et de mélange.	Forme irrégulière et porosité élevée.	Convient aux matériaux résistants à la chaleur.	Possibilité de chargement de plusieurs ingrédients avec différents rapports. Besoins énergétiques modérés.	Temps de séjour prolongé et le mécanisme n'est pas bien compris.	(Keleb et al., 2002, 2004; Seem et al., 2015 ; Kumar et al., 2016)

2.1.1. Granulation en malaxeur

Deux types de mélangeurs peuvent être distingués ; les mélangeurs à faible taux de cisaillement sont caractérisés par une vitesse de rotation très faible alors que ceux à fort taux de cisaillement sont animés d'une vitesse de rotation de l'agitateur très élevée (Castel, 1996). Les granulateurs à taux de cisaillement élevé peuvent présenter certains inconvénients. Oulahna *et al.* (2003) et Börner *et al.* (2016) ont cité la dégradation mécanique des particules fragiles, la modification des propriétés physicochimiques des matériaux thermosensibles et la formation des mottes suite à un excès d'hydratation.

2.1.2. Granulation en lit fluidisé

La granulation en lit fluidisé est une technique qui permet de réaliser trois opérations différentes telles que le mouillage, le mélange et le séchage dans le même appareil (Mörl *et al.*, 2007; Saleh et Guigon, 2009b ; Li *et al.*, 2012) et assure la pulvérisation directe du liquide de mouillage dans le lit de poudre fluidisé (Turchiuli *et al.*, 2005 ; Saleh et Guigon, 2009b). Son principe de fonctionnement est basé sur la mise en contact de trois phases ; le solide est expansé grâce à un gaz ascendant en donnant un état d'équilibre dynamique et le liquide contenant le liant est pulvérisé. Le mélange, la pulvérisation, le mouillage et le séchage se produisent simultanément au sein du lit fluidisé.

La granulation en lit fluidisé est une technique adoptée dans plusieurs travaux de recherche intéressés par l'agglomération des solides divisés (Schaafsma *et al.*, 1999; Hebrard, 2002; Barkouti, 2012; Toumi *et al.*, 2013 ; Machado *et al.*, 2014). Ceci peut être expliqué d'une part par la grande souplesse qu'on trouve dans l'alimentation en solution, en suspension, sous forme de gâteaux, de boue ou de solide fondu, et d'une autre part la production contrôlée de taille, de forme et de porosité des agglomérats. Il a été rapporté que les agglomérats produits par la granulation en lit fluidisé sont plus poreux, moins denses et plus compressibles par rapport à ceux produits par les granulateurs à forces de cisaillement élevés (Horisawa *et al.*, 2000 ; Hausman, 2004).

2.2. Etats de saturation des grains et suivi par mesure du couple de torsion

Le taux de saturation est un paramètre qui a été introduit pour la première fois par Newitt et Conway (1958) dans l'étude de la granulation humide. Ils ont constaté que le taux d'occupation du liquide de mouillage dans le volume poreux influence largement les caractéristiques finales des agglomérats, telles que la porosité, la compacité et la granulométrie. Le taux de saturation

(S) est donné par le rapport du volume du liquide au volume total des pores interparticulaires suivant l'équation suivante :

$$S = W \times \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \times \frac{\rho_s}{\rho_l}$$

W : rapport massique du liquide de mouillage et des particules solides (kg/kg) ;

ε : porosité interparticulaire ;

ρ_s : masse volumique des particules solides (kg/m³) ;

ρ_l : masse volumique du liquide de mouillage (kg/m³).

Pendant l'hydratation et le mélange, l'état de saturation évolue et les grains peuvent exister sous différents états de saturation liquide (Figure 5).

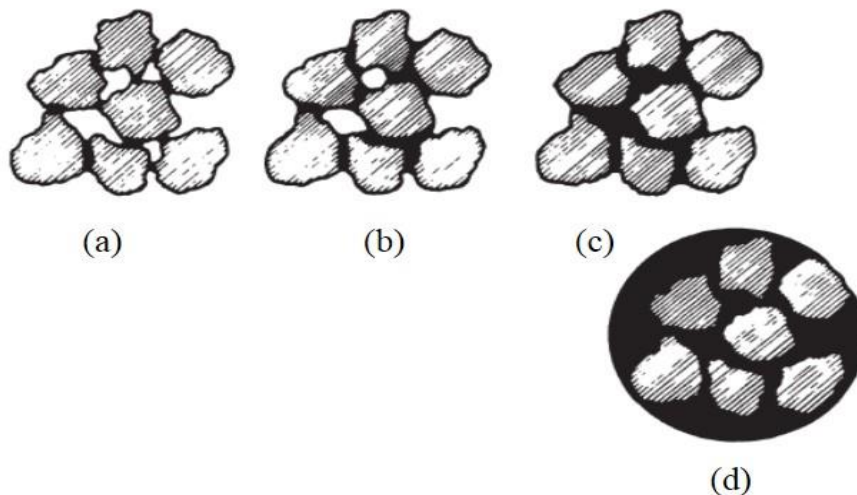


Figure 5. Différents états de saturation des grains par le liquide d'hydratation : (a) état pendulaire, (b) funiculaire, (c) état capillaire, (d) état de goutte (Pietsch, 1997)

De petites quantités du liquide d'hydratation (< 25%) forment des ponts liquides entre les particules en donnant des agglomérats ; c'est l'état pendulaire. En augmentant la quantité du liquide à des taux de saturation supérieurs à 25%, l'état funiculaire s'installe et les pores sont partiellement saturés. L'état de saturation dit capillaire est atteint lorsque tous les espaces interparticulaires sont remplis du liquide (> 85%) et des ménisques concaves se développent à la surface des agglomérats. Une saturation à 100% définit l'état de goutte où toutes les particules sont à l'intérieur de la goutte sans qu'il ait de ponts entre elles (Pietsch, 1997).

Le suivi de l'évolution des caractéristiques rhéologiques des grains au cours du procédé d'agglomération est une nécessité immergée par le développement industriel de la granulation. Leuenberger *et al.* (1979) proposent une mesure en ligne de l'évolution des caractéristiques des grains. Cette mesure traduit la variation de la consistance de la poudre à partir de la mesure de

la puissance consommée par le moteur du granulateur par l'application de l'équation suivante :

$$P = 2\pi NC$$

P : puissance consommée (W).

N : vitesse du mobile (s^{-1}).

C : couple agissant sur l'arbre d'agitation (N.m).

La représentation du profil de consommation de puissance est indiquée dans la figure 6 (Leuenberger *et al.*, 1981). Les différentes phases du profil ont été repérées en traçant les tangentes de la courbe (Hansuld et Briens, 2014). La première phase correspond au début du mouillage où la croissance des agglomérats n'a pas eu encore lieu et les ponts liquides ne sont pas encore créés du fait que le liquide est absorbé ponctuellement sur les particules solides. La puissance consommée est constante et la phase correspond à la nucléation (Ennis et Litster, 1997). La deuxième phase correspond au début de l'agglomération et l'augmentation de la puissance consommée est forte et rapide. C'est la phase de croissance et l'état pendulaire est atteint. La troisième phase correspond à la consolidation-croissance et la puissance consommée semble être constante ou avec une faible augmentation. Il est admis par Ennis et Litster (1997) que ce plateau représente le volume optimal du liquide pour produire les grains recherchés. La quatrième phase s'installe suite à un mouillage excessif et se caractérise par la formation d'amas hétérogènes ce qui se traduit par des fluctuations dans la puissance consommée avec une augmentation modérée. La cinquième indique la transition vers un état de suspension et la puissance consommée chute brutalement.

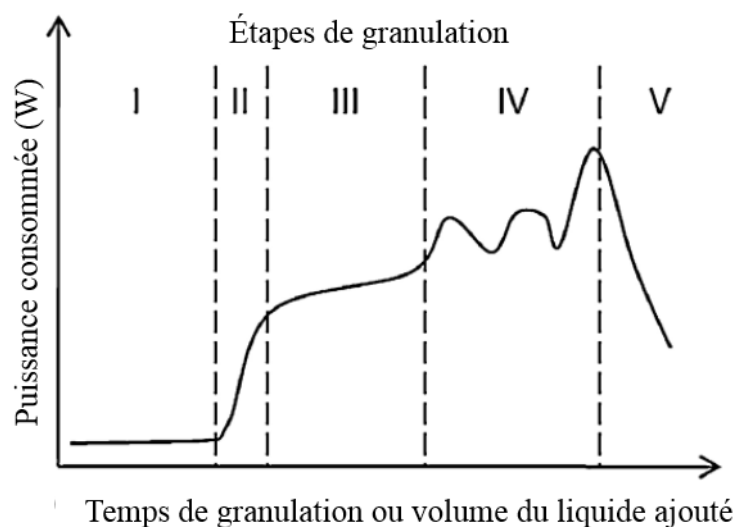


Figure 6. Courbe de consommation de la puissance électrique en fonction du temps ou du liquide de mouillage (Leuenberger *et al.*, 1981)

2.3. Etapes de granulation

En partant de particules natives jusqu'à l'obtention des agglomérats plus grossiers en passant de particules intermédiaires appelées nucléi et en présence d'un liquide d'hydratation (Figure 7), différents phénomènes entrent en jeu (Cuq *et al.*, 2013b). Il a été décrit que le mécanisme de l'agglomération consiste en une succession de cinq différentes étapes (Sastry et Fuerstenau, 1973 ; Cuq *et al.*, 2013a) : la nucléation, le recouvrement en surface (par effet boule de neige), la coalescence, le transfert par abrasion et le transfert par fragmentation enrobage. Ces dernières peuvent se produire simultanément et en compétition.

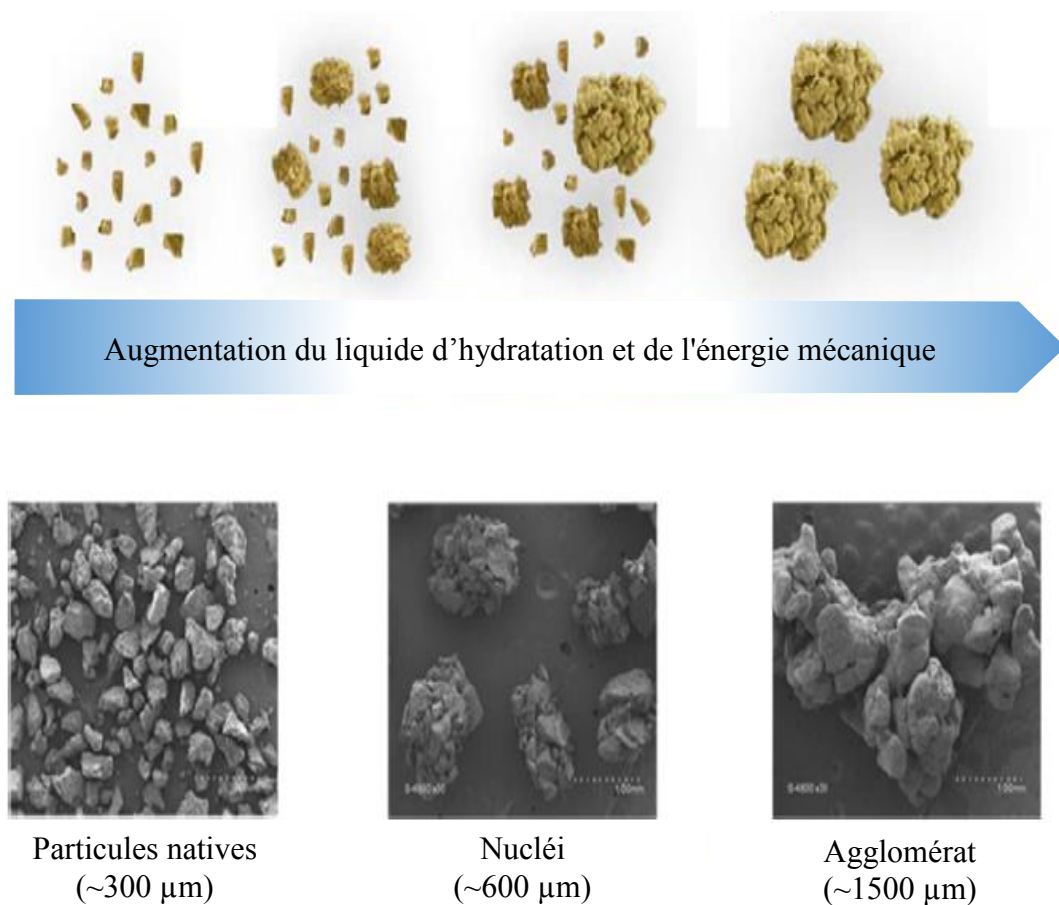


Figure 7. Schématisation de l'agglomération humide de la semoule de blé dur en couscous (Cuq *et al.*, 2013a)

L'inconvénient de l'approche précédente est le rôle insuffisant accordé au liquide de mouillage et sa distribution au sein du milieu granulaire. Des travaux ont mis l'accent sur le mouillage et

les interactions physicochimiques. Une nouvelle approche apparait et propose trois principaux mécanismes (Figure 8) (Sastry et Fuerstenau, 1973; Ennis et Litster, 1997; Iveson *et al.*, 2001).

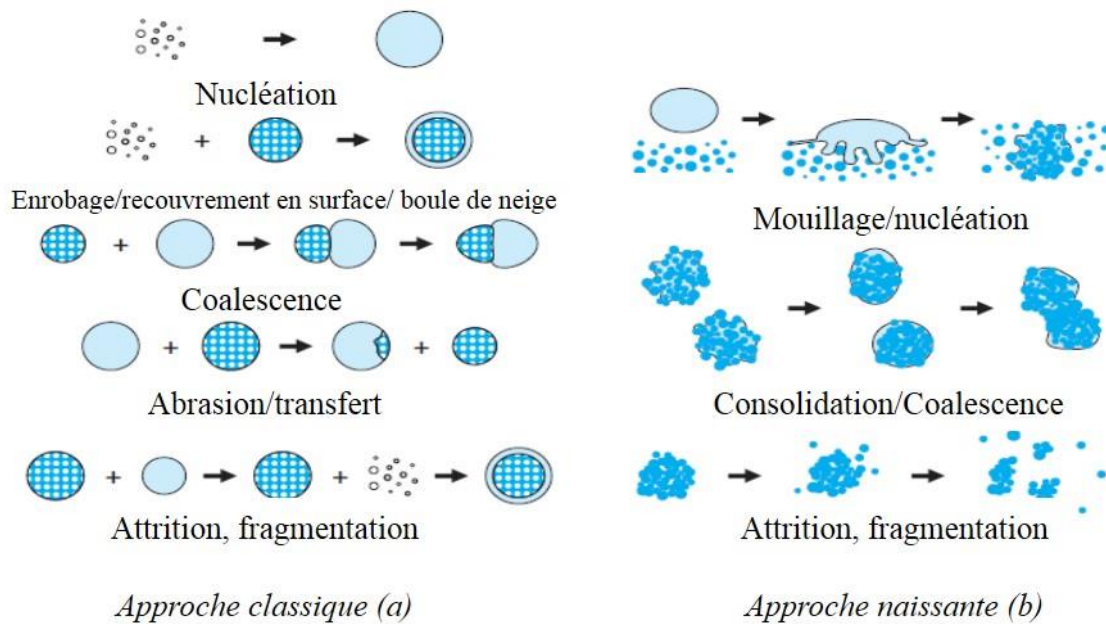


Figure 8. Mécanismes d'agglomération : (a) approche classique (Sastry et Fuerstenau, 1973), (b) approche naissante (Ennis et Litster, 1997)

2.3.1. Mouillage nucléation

Les particules sont amenées en contact du liquide d'hydratation en donnant les nucléi par attraction capillaire.

2.3.2. Croissance et densification

Les nucléi s'associent avec les particules primaires mouillées pour former des agglomérats qui croissent et se consolident sous l'effet du cisaillement.

2.3.3. Rupture/attrition

Les agglomérats formés durant la deuxième étape se brisent suite aux chocs avec d'autres agglomérats ou sous l'effet des contraintes mécaniques de l'agitation.

2.4. Forces inter-granulaires

Pour obtenir des agglomérats à partir d'une matière particulaire, des forces de liaisons devront se manifester entre les particules primaires. Selon Pietsch (1997), les forces de liaison peuvent se diviser en six grands groupes.

2.4.1. Ponts solides

A des températures élevées, les ponts solides se développent par la diffusion des molécules d'une particule à une autre au niveau d'un point de contact. La température peut être introduite de l'extérieur ou créée par la conversion d'énergie et forces de friction pendant l'agglomération. Les ponts solides peuvent se créer suite à des réactions chimiques, cristallisation et durcissement des substances liantes et solidification des composés fondus.

2.4.2. Ponts liquides mobiles

Les forces résultent de la présence d'une interface liquide-solide et sont de nature capillaire et interfaciale. Elles assurent la cohésion d'un grain humide.

2.4.3. Ponts liquides non mobiles

Les forces de liaisons résultent de l'interface liquide-solide mais les forces dominantes sont de nature visqueuse et se créent notamment en présence de polymère.

2.4.4. Forces de Van der Waals

Ou forces électrostatiques qui se créent entre les particules d'autant sont plus proches l'une de l'autre.

2.4.5. Forces électrostatiques

Elles s'établissent sur des distances plus grandes que les forces de Van der Waals.

2.4.6. Forces d'interactions

Elles sont issues des imbrications mécaniques qui se produisent lorsque les particules solides sont de formes variées et irrégulières.

Dans le phénomène d'agglomération de la semoule par voie humide, on ne prend que seuls les cinq derniers types de forces intervenant dans le phénomène.

2.5. Facteurs influençant l'agglomération humide

2.5.1. Taux d'humidité des poudres

La teneur en eau initiale des matériaux agglomérés semble avoir de l'influence sur le mécanisme d'agglomération. Il a été rapporté dans la littérature que le taux d'humidité initial représente un effet positif sur le phénomène de coalescence ([Kristensen et Schaefer 1987](#)) en raison de l'augmentation de la saturation des particules natives qui à son tour, permet l'augmentation de la porosité et de l'écoulement ([Ritala et al., 1988](#) ; [Oka et al., 2015a](#)).

2.5.2. Granulométrie des poudres

La taille des particules élémentaires d'une semoule donnée peut influencer largement la cinétique de l'agglomération et les caractéristiques des agglomérats finaux. Dans la définition du couscous rapportée par le *Codex alimentarius* ([Codex Stan 202-1995](#)), l'accent a été mis sur la taille des semoules pouvant être utilisées pour la fabrication du couscous, en spécifiant les semoules « grosse » et « fine » ou encore « grosse moyenne ».

Lorsque la taille des particules natives est réduite, l'ensemble des forces de liaisons entre les particules semble être favorisé. Pendant l'agglomération humide, le liant diffuse facilement dans les fines particules et provoque l'évolution des matrices protéiques donnant lieu à des ponts visqueux ([Murrieta-Pazos et al., 2014](#)). Le liquide d'hydratation interagit parallèlement avec de l'amidon. Ce dernier se trouve beaucoup plus sous l'état d'un amidon endommagé dans les poudres amylacées finement broyées qui se caractérisent par une capacité d'absorption et de gonflement plus élevées ce qui facilite l'agglomération humide ([Galiba et al., 1988](#) ; [Mohamad Saad et al., 2009](#) ; [Chemache et al., 2012](#)). En outre, [Murrieta-Pazos et al. \(2014\)](#) ont montré que dans les semoules fines, l'amidon endommagé absorbe plus du liquide, gonfle et prend plus de volume ce qui fait augmenter la taille des agglomérats au cours l'agglomération humide. La réduction de la taille des particules solides entraîne leur rapprochement et l'augmentation de la surface spécifique, ce qui favorise les forces de liaisons de type Van der Waals et électrostatiques.

La résistance mécanique des agglomérats est inversement proportionnelle aux diamètres des particules primaires. Plus la granulométrie des farines et semoules est grande et monodisperse, plus les agglomérats formés sont fragiles et déformables ([Rumpf, 1962](#)).

Les semoules et farines issues d'autres céréales que le blé dur, peuvent présenter des caractéristiques granulométriques et de composition différentes. A partir de là, certaines questions peuvent être soulevées en se demandant quel sera leur comportement lors de la granulation humide en couscous.

2.5.3. Viscosité du liquide de mouillage

Le taux de croissance des agglomérats est directement lié à la viscosité du liquide de mouillage ([Hapgood et al., 2002](#); [Van den Dries et al., 2003](#); [Walker et al., 2006](#)) ; il a été montré dans plusieurs travaux que l'augmentation de la viscosité favorise la formation des agglomérats et cela jusqu'à un certain seuil au-delà duquel le taux de croissance diminue ([Hoornaert et al., 1998](#); [Walker et al., 2006](#) ; [Oka et al., 2015b](#)). D'autres études ont essayé de mettre en relation

l'évolution du diamètre moyen, la densité et la structure des agglomérats en fonction de la viscosité du liquide de mouillage (Charles-Williams *et al.*, 2013; Mota-Aguilar et Velázquez, 2015). Par ailleurs, Knight *et al.* (2000), Barkouti *et al.* (2012) et Toumi *et al.* (2013) ont constaté que les liquides de mouillage visqueux donnent des agglomérats plus gros et d'une meilleure résistance mécanique que ceux donnés par l'eau déminéralisée.

Cependant, l'effet de la concentration en agents liant modifiant la viscosité du liquide de mouillage reste insuffisamment expliqué, et les seuils ne sont pas encore déterminés. Les agents liants peuvent trouver d'autres modes d'utilisation, non seulement en solution ou en suspension dans le liquide d'hydratation mais leur mélange avec la poudre à agglomérer peut constituer une possibilité.

2.5.4. Tension de surface du liquide de mouillage

La tension superficielle du liquide de mouillage apparaît comme un des paramètres essentiels à maîtriser dans tous les procédés d'agglomération humide (Aulton et Banks, 1979; Ennis *et al.*, 1990; Suresh *et al.*, 2017). Il a été montré dans les travaux d'Aulton et Banks (1979) que plus l'angle de contact diminue plus la mouillabilité augmente et la distribution de taille des agglomérats obtenus se resserre. De même, la taille moyenne des agglomérats diminue avec la diminution de la mouillabilité lorsque l'angle de contact augmente.

La compacité des agglomérats formés augmente avec l'augmentation de la tension de surface du liquide de mouillage mais la diminution de la tension de surface engendre la formation des agglomérats fragiles et déformables (Iveson *et al.*, 2001). Par ailleurs, cette diminution de la tension de surface peut augmenter le taux de consolidation (Ouchiyama et Tanaka, 1980).

Dans le procédé artisanal de fabrication de couscous, l'utilisation de l'eau salée est une pratique courante qui a pour objectif l'amélioration de la qualité organoleptique et l'aptitude à la conservation. Ceci pourra trouver aussi d'autres explications du fait que le sel agit sur la tension de surface de l'eau d'hydratation et par conséquent sur son angle de contact. Les travaux de Toumi *et al.* (2013) se sont intéressés à l'impact d'une solution saturée en NaCl sur la granulométrie et la friabilité des grains de couscous sec. Il a été montré que l'hydratation avec de l'eau saturée en sel donne des agglomérats plus gros et moins friables. Cependant, des seuils de salinité ne peuvent pas être dépassés et les concentrations optimales ne sont pas encore déterminées.

2.5.5. Taille de la goutte

La nucléation est un phénomène caractérisant le début de l'agglomération humide, elle se manifeste lors du contact du liquide d'hydratation avec le lit de poudre. Cinq étapes ont été notées pour définir la mise en contact entre le liquide et la poudre et le déroulement de la nucléation (Figure 9). Cinq étapes de nucléation sont observées par [Hapgood *et al.* \(2003\)](#) : (1) formation de la goutte, (2) impact et rupture de la goutte, (3) coalescence de la goutte avec la poudre, (4) pénétration de la goutte dans les pores de la poudre, (5) mélange du liquide avec la poudre par dispersion mécanique.

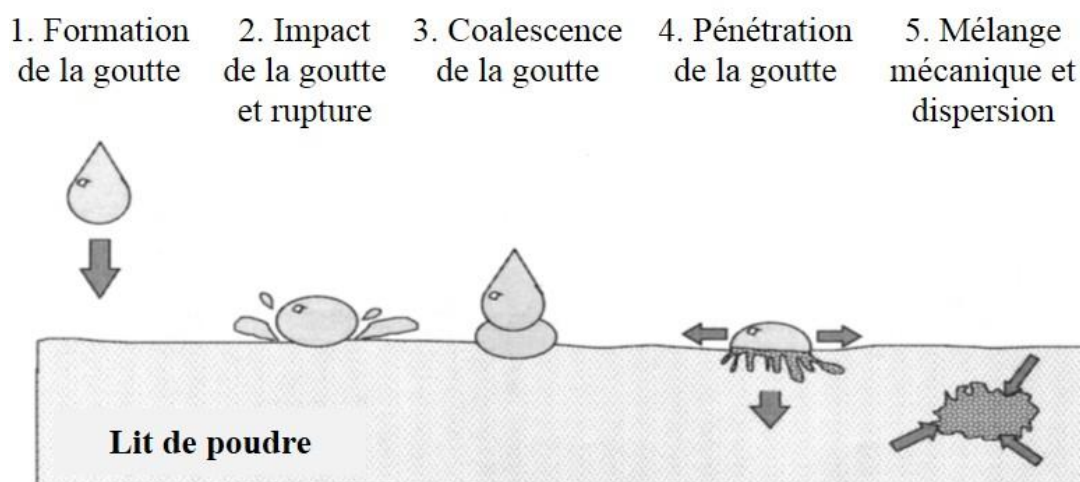


Figure 9. Etapes de la nucléation ([Hapgood *et al.*, 2003](#))

En plus de l'immersion, un autre mécanisme dit « distribution » peut être rattaché à la phase de nucléation en fonction de la taille des gouttes du liquide du mouillage (Figure 10) ([Schäfer et Mathiesen, 1996](#)). La nucléation avec une taille de gouttes faible par rapport à la taille des particules se fera par distribution des gouttes du liquide à la surface des particules, qui en suite pourront commencer à s'agglomérer. En revanche, si les gouttes sont grosses, le mécanisme qui sera mis en jeu est l'immersion des particules et les pores des nucléi formés seront saturés.

Par rapport à la qualité des agglomérats issus des deux mécanismes de nucléation, les résultats d'[Abberger *et al.* \(2002\)](#) ont montré que les grains issus d'une nucléation par immersion croissent par effet boule de neige qui donne naissance à des agglomérats plus denses tandis que la nucléation par distribution favorise la croissance par coalescence et les granules présentent une structure plutôt aérée.

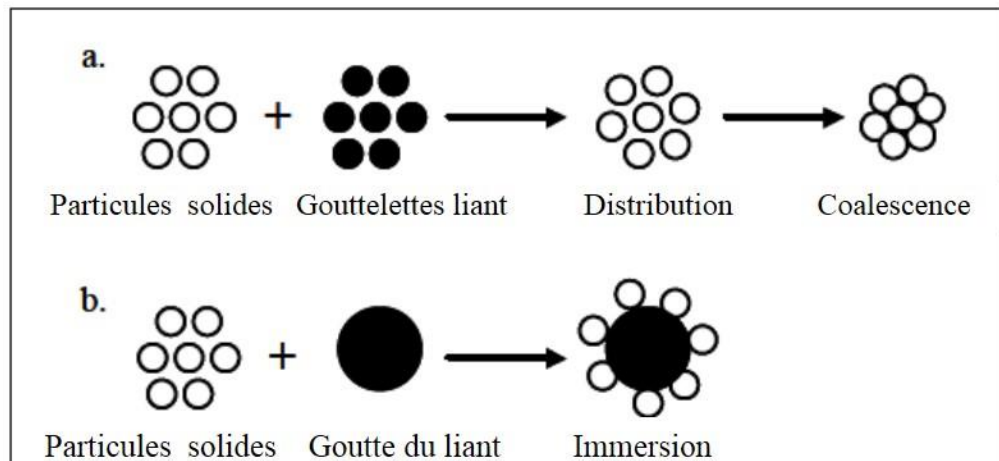


Figure 10. Mécanisme de nucléation en fonction de la taille des gouttes. a) Par distribution, b) Par immersion (Schäfer et Mathiesen, 1996; Tardos *et al.*, 1997)

L'effet de la taille de la goutte sur le mécanisme de la nucléation a été la préoccupation de plusieurs travaux de recherche. Ces derniers ont montré que la taille de la goutte a de l'impact sur la répartition du liquide de mouillage au sein du lit de poudre pendant la phase de nucléation, sur la durée de la phase de consolidation (Gluba, 2003), la morphogénèse des agglomérats (Seo *et al.*, 2002 ; Hapgood et Khanmohammadi, 2009), le temps de pénétration au sein du lit de poudre (Ax *et al.*, 2008), la formation et la croissance des nuclei (Gluba, 2003).

Plusieurs travaux ont étudié la cinétique de nucléation en fonction de la taille des gouttes dans les granulateurs à forces de cisaillement élevées et faibles (Schäfer et Mathiesen, 1996; Scott *et al.*, 2000 ; Gluba, 2003). Les résultats ont montré que la cinétique de nucléation est d'autant plus rapide que la taille des gouttes est grande. Le ralentissement de la cinétique de nucléation est dû à la formation des nucléi peu résistants suite à une pulvérisation du liquide en fines gouttelettes.

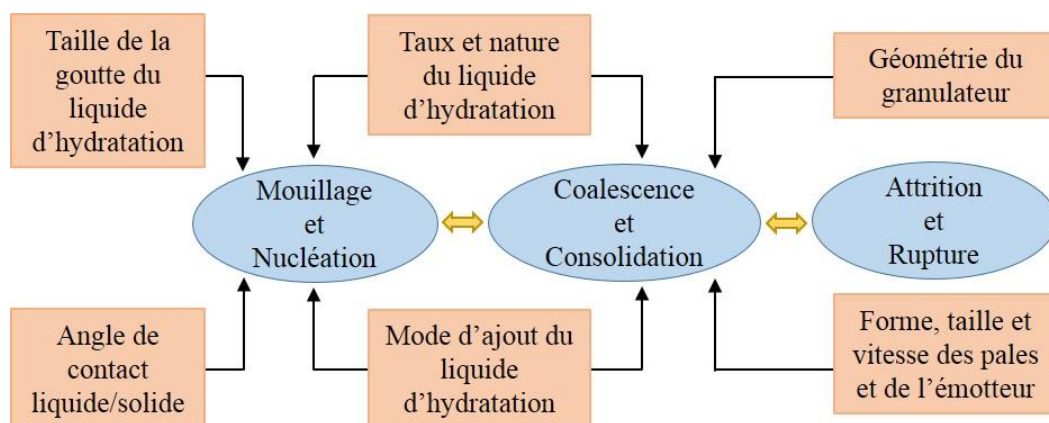


Figure 11. Paramètres influençant les étapes de la granulation humide (Suresh *et al.*, 2017)

2.6. Origine des semoules et farines agglomérées en couscous

La semoule de blé dur est de loin la poudre céréalière la plus adaptée à la fabrication du couscous. Mais d'autres semoules et farines peuvent faire l'objet de matières premières destinées à cette transformation. Les défis à soulever avec les semoules et farines autres que la semoule de blé dur, sont la granulabilité et la qualité des particules de couscous comme produit fini qui définissent son acceptabilité auprès des consommateurs.

2.6.1. Céréales

Le maïs et le millet sont des céréales qui présentent des sources potentielles de farines qui peuvent être utilisées pour l'élaboration des agglomérats de couscous comme alternatives à la semoule de blé dur (Hama-Ba *et al.*, 2016). Beaucoup de travaux scientifiques se sont intéressés à ces deux céréales, Faure (1989) a mené une étude qui décrit le procédé de mise au point à l'échelle pilote d'un rouleau permettant de mécaniser l'opération de grenaison et calibrage des couscous de maïs et de mils avant l'opération de cuisson et de séchage. D'autres études (Houssou *et al.*, 2016) ont été menées sur l'amélioration de la qualité du couscous de maïs par ajout des farines de légumineuses.

La farine de sorgho représente également une poudre céréalière permettant l'obtention du couscous suite à une agglomération humide (Sidib *et al.*, 1981 ; Aboubacar et Hamaker, 2000), mais la contrainte qu'elle présente est le faible rendement au roulage qui peut être dû à la finesse de ces particules quoique la faible granulométrie est souvent accompagnée d'un indice d'absorption d'eau élevé, et une hydratation à des taux élevés permet d'avoir des rendements au roulage satisfaisants (Galiba *et al.*, 1988). En plus de la granulométrie, le taux de cendres dans la farine de sorgho peut être un facteur important à considérer et peut être utilisé comme un bon prédicteur du rendement au roulage (Aboubacar *et al.*, 2006). Par ailleurs, la farine de sorgho peut être utilisée pour l'enrichissement des couscous fabriqués à base de maïs. Il a été rapporté par Hama-Ba *et al.* (2016) que l'utilisation d'une farine composée de sorgho et de maïs contribue à améliorer la qualité texturale et organoleptique du couscous.

La fabrication du couscous à base de la farine d'orge est une pratique très répandue au sein des populations nord-africaines (Grando et Macpherson, 2005). Au niveau artisanal, le roulage de la farine d'orge s'avère difficile et nécessite seulement une très bonne maîtrise du geste manuel. Cependant, peu de travaux scientifiques se sont intéressés à cette vieille céréale et sa mise en œuvre dans la confection d'un couscous de haute qualité nutritionnelle, technologique et culinaire.

En dépit de ses faibles propriétés rhéologiques par rapport à la farine de blé tendre (Sullivan *et al.*, 2010), la farine d'orge peut être utilisée en panification (Rieder *et al.*, 2015 ; Nguyen *et al.*, 2017). Les travaux d'Al-Attabi *et al.* (2017) ont montré que dans le pain fabriqué avec une substitution partielle (10%) de la farine de blé tendre par la farine d'orge, la forme globale et la structure des alvéoles n'ont pas été influencées et des modifications peuvent apparaître au-delà de 15% de substitution.

L'enrichissement des produits céréaliers cuits en composés bioactifs par incorporation de la farine d'orge peut être efficace (Frost *et al.*, 2011). Dans la fabrication des cookies, la farine d'orge peut être une source prometteuse pour l'amélioration de la qualité nutritionnelle et fonctionnelle, et son incorporation réduit l'activité de la polyphénoloxydase qui est une enzyme responsable du brunissement enzymatique d'une part, et augmente l'activité antioxydante d'une autre part (Sharma et Gujral, 2014). Le même résultat est mentionné dans les résultats de Lee (2016), mais cette fois-ci dans la formule de fabrication des nouilles. Le remplacement de la semoule de blé dur par la farine d'orge pourra être intéressant dans la fabrication des spaghettis, De Paula *et al.* (2017) ont démontré que cela permet d'augmenter les teneurs en β -glucan et d'améliorer leurs propriétés.

2.6.2. Légumineuses

Dans la littérature scientifique, certains travaux se sont intéressés à l'étude de la fabrication du couscous à base d'autres céréales. Selon Benatallah *et al.* (2008), la fabrication du couscous à base de formules de semoule de riz et des farines de légumineuse (pois chiche, pois protéagineux et féverole) est possible. Cependant, certaines insuffisances ont été notées comme le faible rendement au roulage variant entre 40,71 et 67,28 %, un indice de prise en masse élevé et l'hétérogénéité de la granulométrie des grains de couscous. D'autres farines de légumineuses comme le soja, le pois chiche, le haricot, le lentille et le lupin ont été ajoutées à la farine de sarrasin (Demir et Demir, 2016) et la farine de pois chiche à la semoule de blé dur (Demir *et al.*, 2010) pour la fabrication du couscous traditionnel en Turquie en vue d'un enrichissement nutritionnel. Il a été noté que les farines de légumineuse affectent de manière significative la qualité organoleptique ; le goût, l'odeur, l'apparence, la fermeté, la qualité culinaire et l'acceptabilité globale du couscous.

En plus de la faisabilité et des critères d'acceptabilité, le couscous produit doit répondre aux exigences de conservabilité. Il a été rapporté dans les travaux de Houssou *et al.* (2016) que

l'enrichissement du couscous de maïs (*yêkè-yêkè*) par la farine de niébé, de soja et de pois bambara permet de fabriquer des couscous pouvant se conserver pendant plus de 9 mois.

2.6.3. Autres origines

2.6.3.1. Manioc

Loin des céréales et des légumineuses et en Côte d'Ivoire, l'*attiéké*, dérivé de la transformation de la racine de manioc qui est une espèce de plantes dicotylédones de la famille des *Euphorbiaceae*, est le produit fermenté le plus consommé. Appelé couramment couscous de manioc, c'est une semoule cuite à la vapeur avant consommation (Kakou, 2000; Regina *et al.*, 2015). La farine de manioc a été utilisée pour l'évaluation des performances techniques d'un granulateur mécanique pour la production d'*attiéké* (couscous de manioc) (Dédédji *et al.*, 2008), et le rendement au roulage était très satisfaisant (98%) avec une bonne maîtrise de la granulométrie définitive des grains de couscous.

2.6.3.2. Gland

La farine de gland de chêne vert qui appartient à la famille des *Fagaceae* a été également utilisée pour la fabrication du couscous artisanal. Le produit obtenu a montré une homogénéité des particules de couscous avec des surfaces lisses et une qualité nutritionnelle très appréciable, tandis que la qualité culinaire est moindre que celle du couscous de blé dur (Doukani, 2015).

2.6.3.3. Sarrasin

Au cours des dernières années, le sarrasin qui appartient à la famille des *Polygonaceae* est devenu une pseudo-céréale populaire en raison de ses divers avantages pour la santé et comme source potentielle d'aliments fonctionnels (Ahmed *et al.*, 2013; Sindhu et Khatkar, 2016). En pastification, l'incorporation de la farine de sarrasin peut augmenter la capacité d'absorption d'eau, la température de gélatinisation, la viscosité maximale et la stabilité de la pâte (Nikolić *et al.*, 2011; Bouasla et Wójtowicz, 2019).

2.6.3.4. Quinoa

Le quinoa est une pseudo-céréale appartenant à la famille des *Chenopodiaceae* de haute qualité nutritionnelle, riche en protéines et notamment en acides aminés essentiels tels que la lysine et l'histidine (Chillo *et al.*, 2008; Rizzello *et al.*, 2016). Le quinoa peut avoir une grande importance dans la fabrication des aliments fonctionnels. Récemment, la farine de quinoa a été utilisée pour l'enrichissement des pâtes à base de la farine de maïs (Sosa *et al.*, 2019) et de la semoule de blé dur (Chillo *et al.*, 2008; Lorusso *et al.*, 2017), l'enrichissement du pain (Wang

et al., 2015) et du pain sans gluten (Machado Alencar *et al.*, 2015; Turkut *et al.*, 2016) et l'enrichissement des cookies (Wang *et al.*, 2015).

2.6.3.5. Amarante

L'amarante est une plante dicotylédone de la famille des *Amaranthaceae*. La farine d'amarante semble être impliquée dans le large domaine de fabrication des produits céréaliers tels que le pain (Sanz-Penella *et al.*, 2013), le pain sans gluten (Machado Alencar *et al.*, 2015), spaghettis (Chillo *et al.*, 2008; Fiorda *et al.*, 2013; Islas-Rubio *et al.*, 2014 ; Bastos *et al.*, 2016), et cookies (Sindhuja *et al.*, 2005). Cette implication peut être expliquée par sa richesse en protéines, en acides aminés, en fibre et en matière grasse qui permettent l'amélioration de la texture et de la qualité culinaire des produits céréaliers (Fiorda *et al.*, 2013).

La littérature est peu riche en travaux portant sur l'agglomération humide des semoules et farines. La quantification et la compréhension des mécanismes de l'agglomération ne sont pas nettement avancées. L'agglomération humide des semoules et farines est encore difficile à contrôler totalement et les résultats ne peuvent pas être généralisés sur toutes les semoules et farines. Cette problématique provient du fait qu'une grande partie des travaux visant la production des grains de couscous ont porté notamment sur la semoule de blé dur et certaines farines de protéagineuses telles que le pois chiche, le pois protéagineux, la féverole, etc. Certaines poudres amylacées issues de différentes origines botaniques à savoir le blé dur, l'orge, le maïs, le sarrasin, l'amarante, le quinoa et le manioc seront le centre d'intérêt dans la suite du travail. Les farines citées précédemment n'ont pas été suffisamment abordées par la littérature scientifique par rapport à l'agglomération humide en grains de couscous. Néanmoins, certains travaux se sont intéressés à leur mise en œuvre dans l'élaboration d'autres produits alimentaires à base de farines et semoules

La transformation des particules élémentaires des farines et des semoules en grains de couscous nécessite la compréhension des mécanismes intervenant tout au long du processus d'agglomération humide. Ces mécanismes sont en partie abordés dans la littérature scientifique, et ce en particulier sur la semoule de blé dur. Cependant, beaucoup d'autres semoules et farines se présentant comme alternatives à la semoule de blé dur n'ont pas été explorées. Il sera d'une grande utilité d'investiguer le comportement au cours de l'agglomération humide en couscous d'autres farines et semoules en se focalisant sur leurs propriétés physico-chimiques, leur capacité de prise en eau, leurs propriétés thermodynamiques d'hydratation et leur capacité à s'agglomérer sous l'effet de l'hydratation et du mélange.

Matériel et méthodes

Le présent travail a été entrepris dans le cadre du projet de recherche CNEPRU (F00920110110) intitulé "produits traditionnels à base de blé dur consommés dans l'Est algérien" au sein du Laboratoire de la Nutrition et de Technologie Alimentaire (LNTA) de l'Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (I.N.A.T.A.A.) de l'Université Frères Mentouri Constantine 1. Ce projet de thèse a été financé partiellement par le programme de coopération algéro-français de bourses en doctorat PROFAS B+ au Laboratoire de Recherche d'Albi en Génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Énergie et de l'Environnement (RAPSODEE) de l'École des Mines d'Albi en France.

Le travail est scindé en deux parties principales (Figure 12) :

- La première partie a été consacrée pour une enquête qui a pour objectif l'établissement d'un diagramme détaillant les différentes étapes de la fabrication du couscous artisanal, l'identification des pratiques suivies et adoptées pour la fabrication traditionnelle et la préparation du plat du couscous et les habitudes socioculturelles liées aux modes de consommation du couscous dans la région Nord-Est de l'Algérie.
- La deuxième partie regroupe le traitement des questions soulevées lors de l'enquête :
 - Influence de l'incorporation de la farine de blé tendre (FBT) sur les propriétés d'agglomération humide de la semoule de blé dur et de la farine d'orge.
 - Impact de l'ajout du NaCl (sel de table) dans l'eau d'hydratation sur les propriétés d'agglomération humide de la semoule de blé dur et de la farine d'orge.
 - L'étude des propriétés d'agglomération humide des farines (farines de maïs, de sarrasin, de quinoa, d'amarante et de manioc) sans gluten et essai de fabrication du couscous artisanal à base de chacune d'elles.

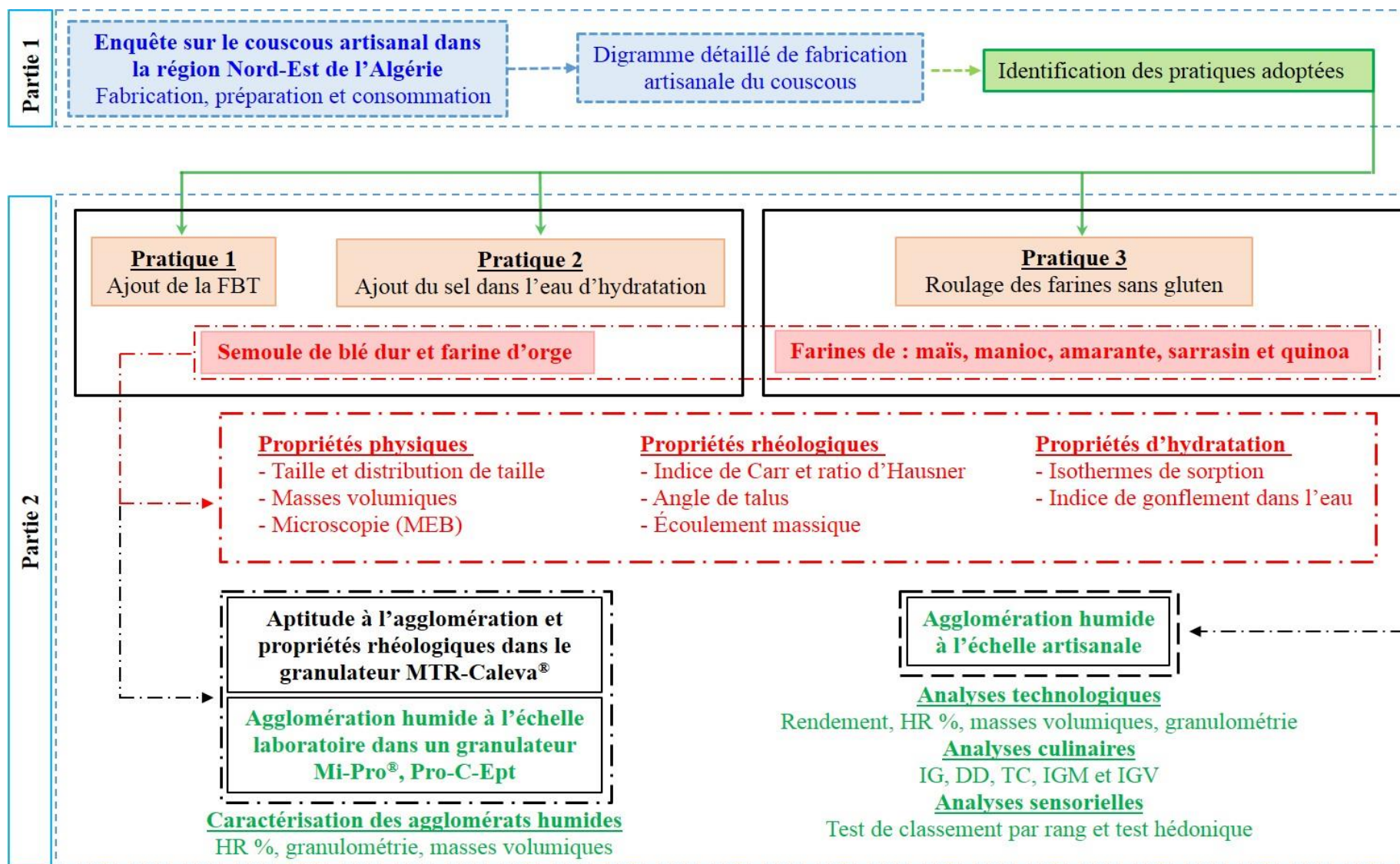


Figure 12. Schéma du dispositif expérimental des différentes parties de la thèse

Partie I

Enquête sur le couscous artisanal

Partie I. Enquête sur le couscous artisanal

1. Lieu de l'enquête

L'enquête sur la fabrication, la préparation et la consommation du couscous artisanal a été menée au Nord-Est de l'Algérie entre 2014 et 2016. Sept wilayas ont été le terrain de l'investigation ; Bejaia, Jijel, Constantine, Guelma, Oum Elbougghi, Batna et Khenchela (Figure 13). Les lieux de l'enquête ont été choisis pour des raisons de commodité d'accès et la popularité du couscous dans ces régions.

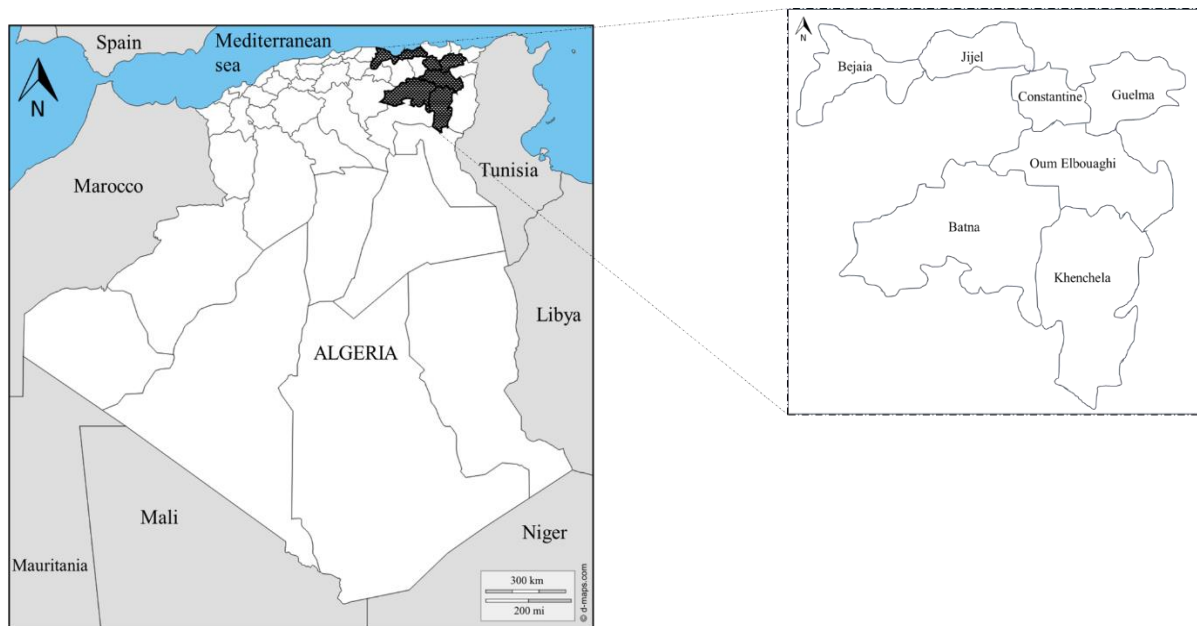


Figure 13. Carte géographique montrant les wilayas ciblées par l'enquête dans le Nord-Est de l'Algérie

2. Population cible

La population cible a été définie suite à une sélection d'un ensemble de personnes qui soit représentatif. Il s'agissait de 517 ménagères âgées entre 23 et 78 ans réparties sur les wilayas ciblées. Le choix des enquêtées est basé sur la possession d'une éventuelle expérience dans la fabrication et la préparation du couscous artisanal. Les informations sont obtenues à partir des interviews accomplies avec les enquêtées en face à face.

3. Description du questionnaire

Dans le cadre de cette enquête, les données ont été collectées par le biais d'un questionnaire écrit préalablement rédigé et développé en langue française (Annexe1). Il contient 40 items sous forme de questions à choix multiples et de questions ouvertes qui ont été réparties en quatre parties :

- i. Informations sur la ménagère enquêtée, pour déterminer les profils des personnes enquêtées.
- ii. Informations générales sur les quantités et le choix des matières premières destinées à la fabrication du couscous artisanal, les fréquences de fabrication du couscous artisanal.
- iii. Recensement des étapes de la fabrication du couscous artisanal. Cette partie s'intéresse aux étapes préliminaires qui précèdent l'hydratation, la nature de l'eau d'hydratation, les différents tamis et ustensiles utilisés, déroulement de l'hydratation et du roulage/calibrage, traitements hydro-thermiques appliqués, opération de séchage et enfin conditionnement et stockage.
- iv. Méthodes de préparation et les habitudes socioculturelles liées aux modes de consommation du couscous.

3.1. Identité de la personne enquêtée

Cette première partie du questionnaire a pour objectif l'identification du profil des enquêtées.

Ce dernier sera présenté sur la base de certains identifiants tels que :

- L'âge des enquêtées pour identifier la catégorie la plus impliquée dans la fabrication et la préparation du couscous ;
- La disponibilité des femmes enquêtées et leurs activités et fonctions, qui agissent sur la quantité du couscous fabriqué et/ou acheté ;
- Le nombre de personnes résidant sous le même toit qui influe directement sur le côté économique donc sur la qualité de la matière première achetée et par conséquent la qualité du couscous fabriqué ;

L'expérience dans la fabrication et la préparation du couscous qui pourra influencer le savoir-faire et la qualité culinaire du couscous.

3.2. Informations générales

Cette section contient des questions réservées aux données générales à propos de la matière première destinée à la fabrication du couscous, elle vise essentiellement à déterminer :

- La quantité de la semoule de blé dur achetée et son utilisation pour la réalisation de certains produits y compris le couscous ;
- L'utilisation des semoules et farines autres que la semoule de blé dur pour la fabrication du couscous ;

- Les besoins des ménagères en couscous (quantité de semoule réservée exclusivement à la fabrication du couscous et la fréquence de cette fabrication), ainsi la tendance de consommation qui varie selon les besoins.

3.3. Etapes de la fabrication du couscous artisanal

C'est la section la plus importante du questionnaire, elle se base essentiellement sur le déroulement des pratiques de chaque étape et du choix de la matière première jusqu'au stockage du produit fini.

- La sélection de la semoule destinée à la fabrication du couscous, ainsi toutes les étapes préliminaires qui la précède ;
- La nature de l'eau d'hydratation et son rôle dans la détermination de la qualité du produit fini ;
- Les différents tamis les plus utilisés dans le calibrage et le tamisage du couscous, et leur influence sur le rendement de produit fini ;
- Les différentes étapes suivies pour la fabrication du couscous artisanal ;
- Le rendement en couscous à la fin d'opération du roulage, qui pourra dépendre des tamis utilisés, de la qualité de la semoule et notamment du savoir-faire de la fabricante ;
- La tendance des fabricantes à réutiliser les coproduits résultant de l'opération du roulage en d'autres produits et plats traditionnels ;
- L'identification des différents critères d'estimation et d'évaluation de la fin du roulage ;
- La description des traitements hydrothermiques comme la précuisson à la vapeur et le séchage tout en se focalisant sur la durée, l'estimation de la fin de chaque opération ;
- L'objectif des opérations succédant le séchage comme le tamisage et le conditionnement.

3.4. Préparation et consommation du couscous

Cette partie vise à connaître les étapes de la préparation du couscous prêt être consommé, les modes de consommation et les aspects socioculturels du couscous dans la région Nord-Est de l'Algérie, elle cible principalement :

- Les quantités du couscous achetées aussi bien artisanal qu'industriel ;
- La conduite de la réhydratation du couscous sec avant la cuisson à la vapeur et son impact sur la qualité du couscous cuit, ainsi que les divers critères pris en considération par les ménagères pour la détermination de la fin de cuisson ;

- Les types de matières grasses les plus utilisées et les plus préférées par le consommateur durant la cuisson du couscous réhydraté ;
- Les différents plats du couscous les plus fréquemment préparés et consommés ;
- Les différents légumes et types de viandes utilisés pour la préparation de la sauce qui accompagne le couscous cuit.
- Les événements et les occasions exclusifs à la consommation du couscous ;

4. Traitement des résultats et analyses statistiques

Les données recueillies sont saisies et analysées sur Excel 2013 et les résultats sont calculés et présentés en pourcentage (%) par rapport à l'ensemble de la population enquêtée. Les analyses statistiques ont été réalisées par le biais du logiciel statistique Minitab 16.0 (Minitab Inc., State College, PA, USA). Le test χ^2 a été réalisé pour analyser les significations des différences entre les groupes de chaque variable étudiée à un seuil de signification de 0,05.

Partie II

Etude de quelques pratiques adoptées durant la
fabrication artisanale du couscous

Partie II. Etude de quelques pratiques adoptées dans la fabrication artisanale du couscous

L'étude expérimentale est scindée en trois sections à travers lesquelles nous allons tenter d'expliquer certaines pratiques adoptées par les ménagères pendant la fabrication artisanale du couscous.

1. Présentation des sections d'étude

1.1. Etude de l'effet de l'incorporation de la farine de blé tendre

Comme décrit dans la première partie, la farine de blé tendre (FBT) est ajoutée durant l'étape de finition pendant la fabrication artisanale du couscous. Cette pratique constitue l'un des objets de cette partie, qui a pour objectif de tenter d'expliquer le rôle de la farine de blé tendre pendant la mise en forme des grains de couscous et son impact sur les agglomérats obtenus.

Le taux d'ajout de la farine de blé tendre aux agglomérats du couscous humide durant l'étape de finition a été estimé à une moyenne de 10 % (masse/masse). L'étude de l'ajout par substitution de la FBT fournie par l'entreprise française Markal (www.markal.fr) a été réalisée sur la semoule de blé dur fournie par la même entreprise et la farine d'orge achetée au marché local à Bejaia à sec avant agglomération. Les différents taux d'ajout par substitution choisis sont : 0 (témoin), 5, 10, 15 et 20 % (masse/masse).

1.2. Etude de l'effet de l'ajout de sel de table (NaCl) dans l'eau d'hydratation

L'ajout du sel dans l'eau d'hydratation engendre des modifications de ses propriétés physiques comme la tension de surface, ce qui pourra modifier ses propriétés d'hydratation. Cette pratique a été bien soulevée durant l'enquête menée au Nord-Est de l'Algérie où la concentration en sel de table dans l'eau d'hydratation est estimée à 1,6 % selon les déclarations des ménagères. Sur la base de cette concentration, la gamme de concentrations testées a été choisie. Les concentrations sont dans l'ordre croissant obtenues par un facteur multiplicatif de 2 : 0 (témoin : eau déminéralisée), 1,6 ; 3,2 ; 6,4 ; 12,8 % et eau déminéralisée saturée en NaCl. L'eau déminéralisée saturée en NaCl fait partie de la gamme dans le but d'amplifier l'effet du sel. L'effet de l'ajout du sel de table dans l'eau d'hydratation a été étudié sur l'agglomération humide de la semoule de blé dur et de la farine d'orge.

1.3. Etude de la granulabilité en couscous des farines sans gluten

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de la variabilité de la matière première (source botanique) sur la granulabilité des farines en couscous. Pour répondre à cet objectif, cinq farines sans gluten ont été choisies à savoir la farine de maïs, du sarrasin, du

quinoa, d'amarante et du manioc. Les farines d'amarante et de quinoa ont été fournies par l'entreprise française Celnat (www.celnat.fr), les farines de maïs et de manioc par l'entreprise française Markal (www.markal.fr) et celle de sarrasin par l'entreprise Nature & Cie (www.nature-et-cie.fr).

Le schéma expérimental suivi dans la réalisation de ces différentes parties se résume dans les étapes suivantes :

- En premier lieu, les propriétés physiques et d'hydratation des différentes matières premières ont été caractérisées ;
- Ensuite, les propriétés rhéologiques pendant l'agglomération humide ont été évaluées dans le rhéomètre dit « Mixer Torque Rheometer » (MTR-Caleva[®], Caleva Ltd, Dorset, England) ;
- Des essais de granulation humide ont été réalisés à l'échelle laboratoire à l'aide d'un granulateur-mélangeur à forces de cisaillement élevées Mi-Pro[®] (Pro-C-Ept, Zelzate, Belgium) ;
- La fabrication du couscous sans gluten est réalisée suivant le procédé artisanal et la qualité technologique, culinaire et sensorielle des couscous secs a été évaluée.

2. Caractérisation des matières premières

Les matières premières (semoules et farines) utilisées dans cette étude sont : la semoule de blé dur, la farine de blé tendre, la farine d'orge, la farine de maïs, la farine de manioc, la farine d'amarante, la farine de sarrasin et la farine de quinoa. Les compositions biochimiques des différentes farines et de la semoule sont fournies par les fournisseurs et regroupées dans le tableau 4.

Tableau 4. Composition biochimique des farines et de la semoule étudiées (g/100 g m.s.)

	Lipides	Amidon	Protéines	Fibres	Cendres
Semoule de blé dur	1,00	71,70	10,90	3,50	0,80
Farine de blé tendre	1,30	72,10	12,00	0,30	0,01
Farine d'orge	2,42	73,25	10,57	8,30	1,86
Farine de maïs	1,70	74,00	8,50	4,00	0,60
Farine de manioc	0,00	88,00	0,50	0,50	0,01
Farine d'amarante	7,10	61,50	15,50	9,50	0,05
Farine de sarrasin	3,10	70,00	12,00	4,10	0,02

Farine de quinoa	5,10	67,50	12,80	6,30	0,10
------------------	------	-------	-------	------	------

2.1. Caractérisation des propriétés physiques

2.1.1. Taille et distribution de taille

La distribution de taille de la semoule et des farines a été déterminée suivant la norme [ISO 13320:2009](#) et cela à l'aide d'un granulomètre à diffraction Mastersizer 3000 avec un disperseur en voie sèche « Aero S » (Malvern[®] Instrument, UK) sous une pression d'air de $2 \cdot 10^5$ Pa. Un indice de réfraction de 1,570 a été utilisé pour les particules analysées et un autre indice de réfraction de 1000 pour la phase continue (air). Cette technique mesure le diamètre moyen d'une particule sous toutes ses orientations par diffraction de la lumière cohérente lors de l'écoulement de l'échantillon dans la cellule de mesure. Les particules sont assimilées à des sphères dont le volume moyen est calculé à partir du diamètre intermédiaire entre la dimension minimale et la dimension maximale. Cette méthode d'analyse est limitée à des grains de diamètre inférieur à 2000 μm . A partir des distributions granulométriques (massique et volumique), les diamètres caractéristiques (d_{50} , d_{90} et d_{10}) et la dispersion granulométrique (DG) sont déterminés. Les analyses granulométriques ont été effectuées en triple.

$$DG = (d_{90} - d_{10})/d_{50}$$

2.1.2. Masses volumiques

Les masses volumiques aérée et tassée sont déterminées selon la norme AFNOR ([NF T51-042:1967](#)). La masse volumique aérée (ρ_a) a été mesurée par une éprouvette graduée en verre de 250 ml, elle est définie par le rapport de la masse mesurée et du volume occupé par cette masse de poudre (g/cm^3) sans tassement. Quant à la détermination de la masse volumique tassée (ρ_t), l'éprouvette contenant de la poudre est fixée sur un volumétre Tap-Tap (Erweka[®] SVM 222) (Figure 14) et la chute du volume de la poudre est suivie jusqu'à ce qu'elle soit constante. Le rapport de la masse de la poudre initiale et le volume final après tassement représente la masse volumique tassée.

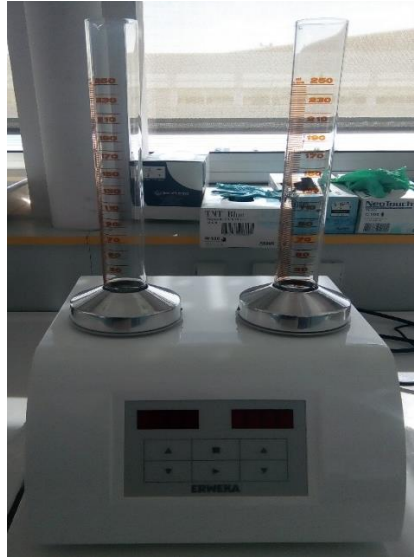


Figure 14. Volumétre Tap-Tap ERWEKA®

La masse volumique vraie (ρ_v) d'une particule est définie par le rapport entre la masse de la particule solide et son volume incluant la porosité fermée. Elle est déterminée à l'aide d'un pycnomètre à déplacement de gaz d'hélium (Accumulator Pyc 1330, Micromeritics®) avec une cellule de 10 cm³. Une masse connue de poudre est introduite dans la cellule de mesure, la variation de pression d'hélium permet la détermination du volume occupé par l'échantillon.

Les masses volumiques vraie (ρ_v), tassée (ρ_t) et aérée (ρ_a) sont utilisées pour calculer le ratio de densification (RD) et les porosités ouvertes, vrac et après tassement (\mathcal{E} (vrac) et \mathcal{E} (tassée)).

$$\text{RD (\%)} = \left(\frac{\rho_t}{\rho_v} \right) * 100$$

$$\mathcal{E} (\text{vrac}) = 1 - \left(\frac{\rho_a}{\rho_v} \right)$$

$$\mathcal{E} (\text{tassée}) = 1 - \left(\frac{\rho_t}{\rho_v} \right)$$

2.1.3. Observations microscopiques

L'observation de la microstructure des particules de semoules et farines a été effectuée par un microscope électronique environnemental (Philips® XL30 FEG, ESEM-FEG, FEI Company). Les échantillons ont été fixés sur un support du microscope en utilisant un ruban adhésif à double face. Des observations à différents grossissements ont été réalisées. Cette technique permet une détermination qualitative de la composition de surface, la nature et la taille de différentes particules (son, grains d'amidon, particules natives de semoule ou farine) et l'état

de surface. Les images obtenues ont été traitées à l'aide d'un logiciel de travail sur l'image Mesurim 3.4.

2.2. Teneur en eau

Les teneurs en eau des semoules et farines sont déterminées par séchage à 105°C pendant 24 heures (Méthode AACCC 44-01.01).

2.3. Propriétés rhéologiques des semoules et farines

Les propriétés d'écoulement des semoules et farines ont été évaluées par détermination de plusieurs paramètres tels que l'Indice de Carr (IC), le Ratio d'Hausner (HR), l'écoulement massique et l'angle de talus.

2.3.1. Indice de Carr et Ratio d'Hausner

L'Indice de Carr et le Ratio d'Hausner constituent une première catégorie d'outils pour caractériser les propriétés d'écoulement d'un matériau granulaire et ce, en raison de leur simplicité (Carr, 1965 ; Abdullah et Geldart, 1999).

L'aptitude au tassement de la poudre et les frottements entre particules lors de l'écoulement de la poudre sont caractérisés par les indices d'Hausner (IH) et de Carr (IC) (Tableau 5) qui sont calculés comme suit.

$$IH = \rho_t / \rho_a$$

$$IC = (\rho_t - \rho_a) / \rho_t$$

Où ρ_a et ρ_t sont respectivement la masse volumique aérée et la masse volumique tassée.

Tableau 5. Caractérisation de l'écoulement selon l'indice de Carr et le ratio d'Hausner (Carr, 1965 ; Amidon *et al.*, 1999)

Écoulement	Excellent	Bon	Moyen	Faible	Très faible	Mauvais
IC	5 – 15	12 – 16	18 – 21	23 – 35	33 – 38	Sup à 40
IH	1,00 – 1,11	1,11 – 1,19	1,19 – 1,35	1,35 – 1,45	1,45 – 1,59	Sup à 1,59

2.3.2. Angle de talus et écoulement massique

L'outil utilisé est un appareil d'écoulement (Powder tester Erweka®) qui permet de mesurer l'écoulement massique et l'angle de repos des semoules et des farines. Pour plus de détails pour l'angle de repos, une classification de l'écoulement granulaire à partir de l'angle de talus est proposée selon le tableau 6.

Tableau 6. Caractérisation de l'écoulement selon l'angle de repos (Carr, 1965 ; Amidon *et al.*, 1999)

Angle de talus	25 – 30°	30 – 38°	38 – 45°	45 – 55°	Sup à 55°
Écoulement	Très bon	Libre	Adéquat	Cohésif	Très cohésif

2.4. Propriétés d'hydratation

Les propriétés d'hydratation ont été déterminées par deux méthodes ; par méthode gravimétrique et par le test de gonflement.

2.4.1. Isothermes de sorption

Pour déterminer les propriétés d'hydratation des différentes semoules et farines par la méthode gravimétrique décrite par Mohamed Saad *et al.* (2009), une balance de sorption entièrement automatisée dite Dynamic Vapor Sorption-(DVS) (Figure 15) constituée d'une microbalance permettant de mesurer des changements de masse inférieurs à 10^{-7} g a été utilisée. La microbalance placée dans une enceinte à température contrôlée et maintenue constante mesure les phénomènes de sorption de vapeur, adsorption et désorption au cours du temps. L'humidité à fournir est générée par un mélange de gaz sec et saturé en vapeur dont les proportions correctes sont contrôlées par un débit massique.

L'échantillon préalablement séché est réparti uniformément dans la coupelle de mesure (propre et sèche) qui est ensuite placée dans la microbalance. L'échantillon est pré-équilibré à une humidité relative de 0 % par un flux continu d'air sec. La variation limite par palier de dm/dt est de 5 μ g pour une durée maximale de 6 h. Les différents paliers d'équilibre définis peuvent être atteints avec un débit d'azote de 375 cm^3/h .

Les isothermes de sorption de vapeur d'eau et de vapeur d'hexane ont été obtenues par variation de l'humidité relative de 0 à 95 % en 11 paliers à une température constante (25 °C).

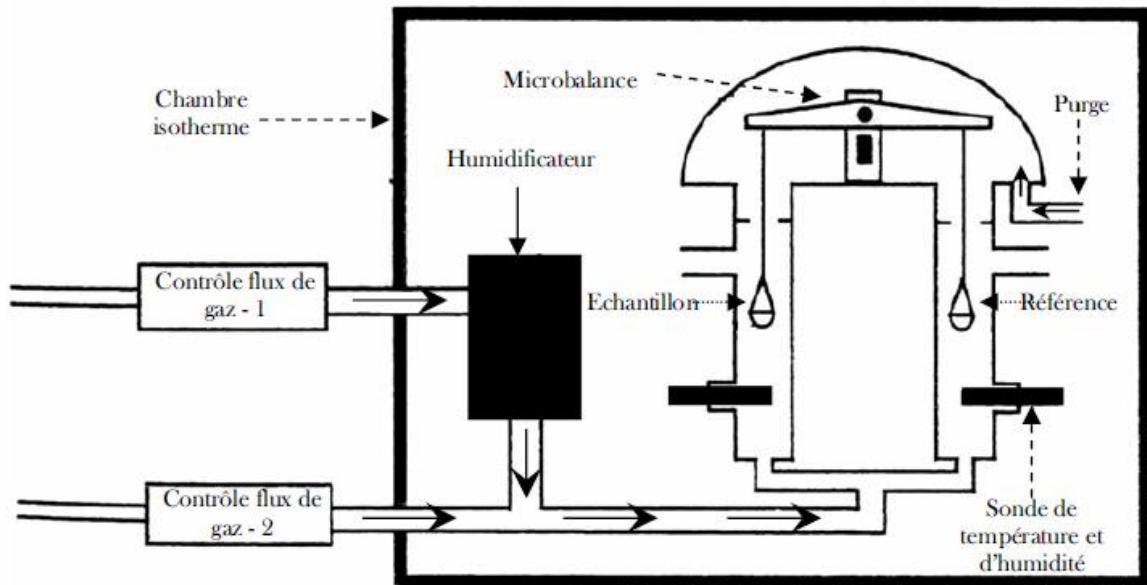


Figure 15. Schéma d'un système dynamique de sorption de vapeur (DVS)

2.4.2. Test de gonflement dans l'eau

Les tests de gonflement ont été effectués dans des éprouvettes suivant la méthode décrite par (Hebrard, 2002). Une quantité de semoule ou farine exactement mesurée, masse et volume, est placée dans l'éprouvette. Un volume d'eau connu est ajouté (en excès). Après homogénéisation manuelle avec des retournements successifs de manière à bien hydrater l'ensemble des particules, les éprouvettes sont mises au repos. Lorsque l'équilibre est atteint (après 4 h), le volume final des grains humides est mesuré. L'indice de gonflement (IG) est exprimé en ml d'eau /100 g d'échantillon (matière sèche).

$$IG = \frac{V_f - V_i}{M_s} * 100$$

Où : V_f est le volume final des grains humides (ml), V_i est le volume initial des grains à l'état sec (ml) et M_s est la masse sèche de la prise d'essai (g).

3. Détermination de l'aptitude à l'agglomération

Dans le but du suivi de l'agglomération humide en temps réel, la mesure du couple développé par la pale ou de la puissance consommée par le moteur du mélangeur ont constitué les premières méthodes en ligne de suivi du procédé d'agglomération (Lindberg *et al.*, 1974; Travers *et al.*, 1975 ; Holm *et al.*, 1985; Landin *et al.*, 1996; Faure *et al.*, 2001; Betz *et al.*, 2003, 2004). Ces méthodes restent aujourd'hui encore les plus développées. Les mesures de puissance et de couple peuvent être effectuées en fonction du taux de liquide de mouillage ou du temps

d'agglomération et constituent un moyen simple et peu coûteux pour caractériser l'aptitude à l'agglomération d'un milieu granulaire humide (Faure *et al.*, 2001; Betz *et al.*, 2003; Gluba, 2005).

Les propriétés rhéologiques pendant l'agglomération humide des semoules et farines sélectionnées et des différents mélanges ont été estimées à l'aide d'un rhéomètre dit « Mixer Torque Rheometer » (MTR-Caleva[®], Caleva Ltd, Dorset, England) (Figure 16). Ce dernier enregistre un couple de torsion en fonction du ratio d'hydratation L/S (volume du liquide en ml/masse de la semoule en g) ou en fonction du temps de granulation (Rowe et Sadeghnejad, 1987; Hancock *et al.*, 1994; Rowe, 1996; Sakr *et al.*, 2012; Suresh *et al.*, 2017). Le MTR-Caleva[®] se compose d'un distributeur automatique du liquide d'hydratation et d'une enceinte de mélange contenant deux pales d'agitation (Figure 17) portées par un bras de 10 cm de long avec une gamme de torsion de 0 à 10 N.m (Landin *et al.*, 1995).

Le MTR-Caleva[®] permet l'enregistrement des variations du couple de torsion en Newton mètre (N.m) à une fréquence d'acquisition de 1 Hz en fonction du ratio du mouillage Liquide/Solide (L/S). Cette technique permet également de déterminer le rapport d'hydratation (L/S) optimal à la granulation d'une semoule ou d'une farine (Goalard, 2005; Sakr *et al.*, 2012 ; Kuhs *et al.*, 2017). Ce rapport correspond à la valeur maximale du couple de torsion moyen qui est obtenu durant l'état capillaire (Ennis, 1996; Ennis et Litster, 1997; Oulahna *et al.*, 2003).

L'apport du liquide d'hydratation se fait en discontinu dans la cuve de mélange sous forme d'un filet. Les conditions d'hydratation sont définies après optimisation du volume d'eau ajoutée (1 ml/min), de la masse de la semoule malaxée (40 mg), de la vitesse d'agitation des pales (42 tr/min) et de la température du bol de mélange (20 à 21°C).

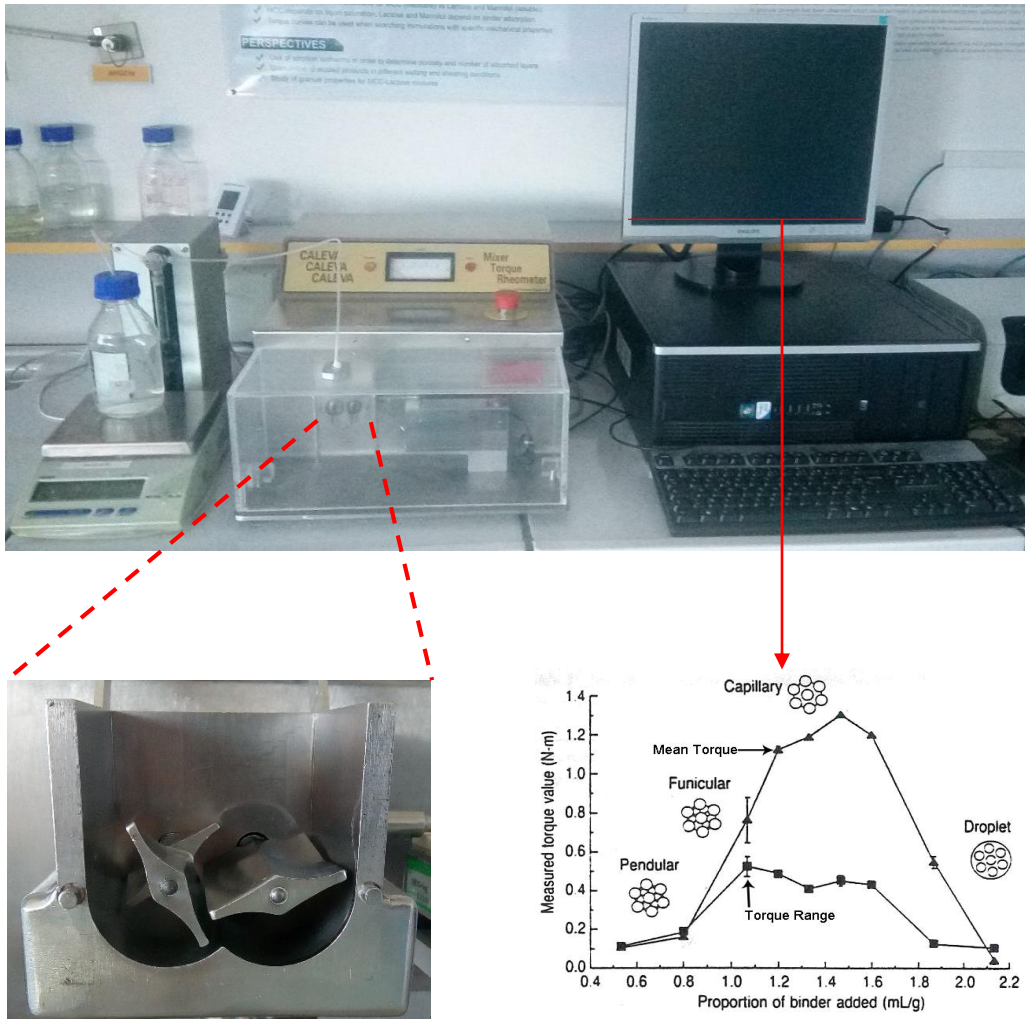


Figure 16. Mixer Torque Rheometer (MTR-Caleva®)

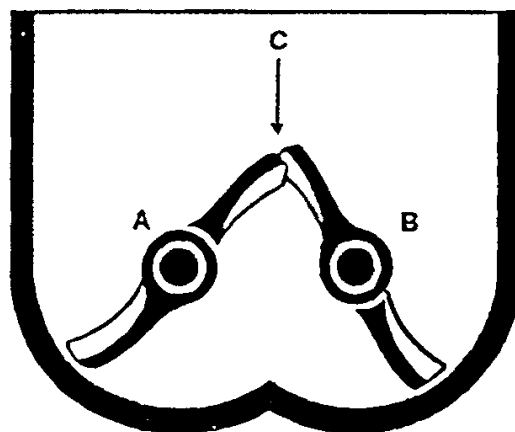


Figure 17. Schéma d'une enceinte du malaxeur MTR-Caleva® : (A) arbre d'entraînement principal, (B) arbre secondaire, (C) plan de cisaillement (Landin et al., 1995)

4. Essais d'agglomération à l'échelle laboratoire

4.1. Conduite de l'agglomération

Après avoir déterminé les propriétés rhéologiques et le ratio d'hydratation optimal (L/S) à l'agglomération des farines, la mise en forme de ces dernières a été menée à l'échelle laboratoire à l'aide d'un mélangeur-granulateur à haute vitesse de cisaillement Mi-Pro® (Mi-Pro, Pro-C-Ept, Zelzate, Belgium) (Figure 18).

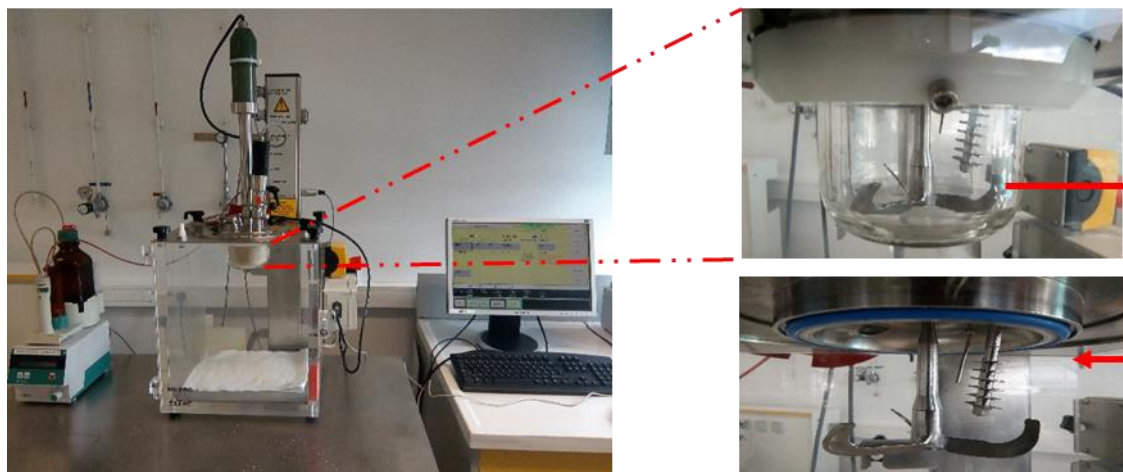


Figure 18. Mélangeur-granulateur Mi-Pro® Pro-C-Ept

Le mélangeur-granulateur Mi-Pro® est un appareil modulaire qui permet de granuler des masses de poudres variant entre 40 et 2000 g. Le mélangeur-granulateur est équipé de deux éléments rotatifs verticaux : un agitateur à trois pales et un émoteur. Le liquide de mouillage arrive au contact de la poudre au moyen d'une pompe volumétrique à seringue de type Dosimat® 760 (Metrohm, Berchem, Belgium) par l'intermédiaire d'un tube capillaire de 400 µm de diamètre. Celui-ci est orienté vers l'émoteur afin de réduire la taille des gouttes au cours de la phase d'ajout du liquide de mouillage (Figure 19).

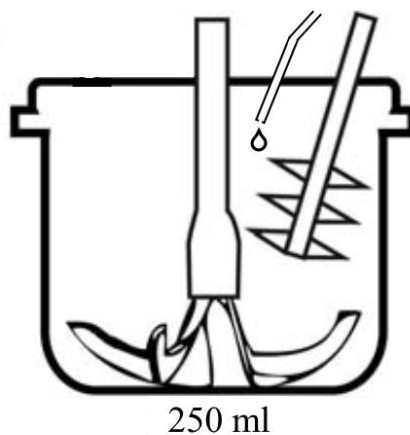


Figure 19. Représentation schématique du bol du mélangeur-granulateur Mi-Pro®

Avant d'entamer la granulation humide sur le mélangeur-granulateur Mi-Pro[®], les paramètres opératoires ont été optimisés au préalable et sont donnés dans le tableau 7. La mise en forme a été réalisée sur des échantillons de 100 g de semoule ou de farines sélectionnées dans un bol de 250 ml. Avant de lancer l'agglomération humide proprement dite, la palle est actionnée à une vitesse constante de 100 tr/min dans le but de mélanger et homogénéiser le lit de poudre à sec pendant 60 secs. Ensuite, la granulation en présence d'un liquide d'hydratation a été réalisée à des vitesses de 500 et 1500 tr/min pour la palle et l'émoteur respectivement. L'addition du liquide d'hydratation est effectuée par injection à un débit de 2 ml/min par le biais d'une pompe volumétrique à seringue Dosimat[®]. Une fois le volume de l'eau d'hydratation nécessaire est injecté dans le bol, le mélangeur-granulateur est arrêté. Enfin, le lit des agglomérats humides est mélangé pendant 60 secs sans addition de l'eau d'hydratation. Cette dernière opération a pour objectif la maturation et la dispersion des agglomérats humide obtenus.

Tableau 7. Paramètres opératoires de la granulation sur le mélangeur-granulateur Mi-pro[®]

Paramètres opératoires	Valeurs
Volume du bol	250 ml
Masse de la poudre granulée	100 g
Temps de mélange-homogénéisation	60 secs
Vitesse de la palle	500 tr/min
Vitesse de l'émoteur	1500 tr/min
Débit d'injection de l'eau d'hydratation	2 ml/min
Temps de maturation	60 secs
Volume du liquide d'hydratation	En fonction du L/S_{opt} déterminé lors de la granulation sur MTR-Caleva [®]

4.2. Caractérisation des agglomérats humides

Parmi les nombreuses caractéristiques physiques, physicochimiques et comportementales des grains susceptibles d'être mesurées, nous nous sommes limités à celles présentant une importance toute particulière par rapport à l'objectif de notre étude. Ainsi, les paramètres susceptibles d'aider à l'interprétation des résultats obtenus ont été retenus. Ces caractéristiques sont la distribution granulométrique, le rendement d'agglomération, la teneur en eau, la densimétrie.

4.2.1. Distribution granulométrique

La distribution de taille a été mesurée immédiatement après l'achèvement de l'agglomération humide. La taille des agglomérats humides a été déterminée par tamisage ([ISO 2591-1:1988](#)) à l'aide d'une tamiseuse (AS 200 digit, Retsch®, Germany). Les échantillons collectés ont été tamisés à travers une colonne de huit tamis métalliques de diamètres décroissants (3150, 2500, 2000, 1600, 1250, 1000, 800 et 630 μm) pour séparer les différentes classes granulométriques. Les diamètres des mailles des tamis ont été choisis de manière à avoir une distribution géométrique tout en gardant le rapport $\Delta x_i/x_i$ constant (Δx_i et x_i sont respectivement la largeur et la moyenne de la classe granulométrique). La colonne de tamis a été manuellement secouée pendant 20 min de telle sorte à éviter l'attrition des agglomérats humides et leur désintégration. La distribution de taille est obtenue par pesée des fractions retenues sur chaque tamis et exprimée en pourcentage (%) par rapport au poids total tamisé et le diamètre médian (d_{50}) a été calculé et exprimé en μm .

Le rendement d'agglomération a été obtenu par le rapport entre la masse des agglomérats ayant une granulométrie comprise entre 630 et 2500 μm et la masse totale des agglomérats collectés. Ce rendement a été déterminé pour distinguer entre le taux des agglomérats obtenus et celui des particules non agglomérées (fraction fine) et de la fraction pâteuse. Le taux de cette dernière a été déterminé par le rapport entre la masse des agglomérats ayant une granulométrie supérieure à 250 μm et la masse totale des agglomérats obtenus à la fin de l'opération d'agglomération.

4.2.2. Teneur en eau par classes d'agglomérats

La teneur en eau déterminée sur les différentes classes d'agglomérats humides et sur toutes les granulométries confondues suivant la méthode [AACC 44-01.01](#). Les résultats ont été exprimés g d'eau/100 g de matière sèche.

4.2.3. Masses volumiques

Les masses volumiques aérée et tassée des agglomérats humides sont déterminées selon la norme AFNOR ([NF T51-042:1967](#)) et exprimées en g/cm^3 . La masse volumique aérée (ρ_a) a été mesurée par une éprouvette graduée en verre de 50 ml, elle est définie par le rapport de la masse mesurée et du volume occupé par cette masse de poudre sans tassement. Quant à la détermination de la masse volumique tassée (ρ_t), l'éprouvette contenant les agglomérats humides est fixée sur un volumétre Tap-Tap (Erweka® SVM 222) (Figure 14), et la chute du volume de la poudre est suivie jusqu'à ce qu'elle soit constante. Le rapport de la masse de la poudre initiale et le volume final après tassement représente la masse volumique tassée.

5. Essais d'agglomération à l'échelle artisanale

5.1. Fabrication artisanale du couscous

Les essais de fabrication du couscous à l'échelle artisanale ont été appliqués seulement sur les farines sans gluten seulement. Ceci en raison de la méconnaissance du comportement de ces dernières pendant leur granulation humide en grains de couscous. Sachant que la semoule de blé dur et la farine d'orge ont toujours été utilisées pour la fabrication du couscous.

La transformation des particules élémentaires des semoules et farines en couscous a été menée suivant le protocole artisanal établi dans la première partie de cette thèse (enquête sur la fabrication, la préparation et la consommation du couscous artisanal dans la région Nord-Est de l'Algérie) (Chemache *et al.*, 2018).

Pour la fabrication de chaque type du couscous, une prise d'essai de 1000 g de semoule ou de farine a été utilisée. Pour les poudres présentant des granulométries importantes, une séparation des deux fractions (fraction fine $< 500 \mu\text{m}$ et fraction grosse $\geq 500 \mu\text{m}$) a été réalisée. Avant hydratation, la semoule et les farines sont précuites à la vapeur d'eau à une température d'environ 98 °C pendant une durée appropriée pour chaque semoule et farine (de 4 à 8 min) de telle sorte que la poudre ne soit pas collante.

Pour l'hydratation des poudres, l'eau déminéralisée avec ou sans sel de table a été ajoutée par pulvérisation à l'aide d'un pulvérisateur. Ce dernier permet une meilleure répartition du liquide d'hydratation dans le lit de poudre et évite la formation des mottes pâteuses.

Le roulage est effectué sur une petite quantité de poudre dans une large écuelle en bois (*guesâa*), il est assuré grâce aux mouvements circulaires de va-et-vient des mains ouvertes, paumes vers le bas avec un léger écartement des doigts. L'addition de la poudre se fait progressivement en fonction du taux d'hydratation jusqu'à l'obtention des agglomérats pouvant atteindre un diamètre de 6 mm. Les grumeaux ayant pris naissance précédemment, ont subi un désagrégage sur un tamis de 2860 à 3300 μm . L'objectif de cette opération est de réduire la taille des agglomérats en les faisant passer à travers les mailles du tamis avec l'ajout de petites quantités de la poudre non hydratée pour réduire l'aspect pâteux des grumeaux. Après chaque roulage, la granulométrie des agglomérats formés est contrôlée par tamisage calibrage à travers des tamis adéquats.

Les opérations d'hydratation, roulage, calibrage, tamisage se succèdent jusqu'à l'obtention des grains de couscous humide de taille désirée. Le couscous humide est immédiatement précuit à la vapeur d'eau une seule fois pendant 15 min à une température d'environ 98 °C. Ensuite, le

couscous précuit est séché à l'air libre à l'ombre pendant 48 heures puis au soleil pendant 24 heures.

5.2. Evaluation de la qualité technologique des couscous secs

5.2.1. Calcul du rendement au roulage

Le rendement au roulage est exprimé en pourcentage par le rapport entre la masse du couscous sec obtenu et la masse de la poudre (semoule ou farine) utilisée pour sa fabrication (Benatallah *et al.*, 2008).

5.2.2. Détermination de la teneur en eau

Les teneurs en eau des couscous secs obtenus sont déterminées par séchage à 105°C pendant 24 heures (AACC 44-01.01).

5.2.3. Mesure des masses volumiques

Les propriétés densimétriques ont été évaluées par la détermination des masses volumiques aérée (ρ_a) et tassée (ρ_t) suivant la norme AFNOR (NF T51-042:1967). La procédure suivie est identique à celle décrite précédemment dans la section "II.4.2.3." en page 49.

Les masses volumiques vrac et tassée, ρ_a et ρ_t , sont utilisées pour calculer les indices d'Hausner (IH) et de Carr (IC) caractérisant respectivement l'aptitude au tassement des couscous secs et les frottements entre particules lors de l'écoulement.

5.2.4. Analyses granulométriques

La distribution de taille est déterminée par un tamisage manuel, à l'aide d'une série de 08 tamis (RETSCH®) avec des ouvertures normalisées AFNOR (NF P18-560:1990) en progression géométrique ($r = 2^{1/3}$) de 630 à 3150 μm .

L'échantillon de couscous sec (100 g) est placé sur le tamis supérieur de la série de tamis empilés selon leur ouverture (la plus petite en-dessous : 3150, 2500, 2000, 1600, 1250, 1000, 800 et 630 μm). Après un secouage automatique pendant 2 min, les fractions retenues sur chaque tamis sont pesées. A partir de la fraction massique obtenue pour chaque classe granulométrique, les distributions de taille sont tracées en fréquence et en refus cumulé. Les distributions de taille en cumulé permettent de remonter aux paramètres classiques des distributions granulométriques : le diamètre médian (d_{50}) correspondant à un passant cumulé de 50 % et les diamètres d_{10} et d_{90} correspondant respectivement à un passant cumulé de 10 et 90 % et qui sont caractéristiques de la dispersion granulométrique (DG) donnée suivant la formule suivante : " $DG = (d_{90} - d_{10})/d_{50}$ ".

5.3. Evaluation des propriétés culinaires des couscous secs

5.3.1. Indice de gonflement

L'indice de gonflement des différents couscous fabriqués a été déterminé suivant la méthode décrite par [Guezlane et Abecassis \(1991\)](#). Un échantillon de $20 \pm 0,01$ g de couscous sec est versé dans une éprouvette graduée d'une capacité de 200 ml contenant 50 ml d'eau distillée à 100 °C. L'éprouvette est bouchée et 10 retournements ont été effectués pour assurer une meilleure hydratation de l'ensemble des grains constituant la prise d'essai. Un autre volume de 50 ml d'eau distillée à une température de 100 °C est ajouté pour faire descendre les particules restées collés le long de la paroi de l'éprouvette. Celle-ci est bouchée et mise debout dans un bain Marie à température contrôlée (25 et 95 °C) et le volume du couscous est enregistré après 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 et 60 min. l'indice de gonflement (IG) est déterminé selon l'équation suivante :

$$IG (\%) = 100 * (V_f - V_i) / V_i$$

Où V_f est le volume final du couscous lu sur l'éprouvette et V_i est le volume initial du couscous sec lu sur l'éprouvette.

Selon [Ounane et al. \(2006\)](#), les valeurs expérimentales de l'indice de gonflement peuvent être en relation avec la capacité d'hydratation du couscous cuit. Un indice de gonflement élevé indique une bonne qualité du produit fini.

5.3.2. Degré de délitescence

Il a été rapporté par [Guezlane \(1993\)](#) que le degré de délitescence constitue un paramètre décrivant la qualité culinaire du couscous et un critère fondamental de la qualité organoleptique du couscous cuit.

La méthode suivie pour la détermination du degré de délitescence est celle décrite par [Guezlane et Senator \(1985\)](#) et [Guezlane \(1993\)](#). Une prise d'essai de 10 g de couscous sec est placée dans un bécher de 200 ml et hydratée avec 16,5 ml d'eau distillée bouillante salée à 5 g/l. Après addition de l'eau, le bécher est immédiatement recouvert et placé dans une étuve maintenue à 90 °C pendant 12 min. Un volume de 50 ml d'eau distillée à 25 °C est ajouté au couscous cuit dans un bécher de 200 ml. Après une agitation durant 6 minutes par un agitateur magnétique ; le surnageant est récupéré par filtration sur un tamis de maille de 1000 µm. Une partie aliquote de 10 ml est séchée dans l'étuve à 100°C jusqu'au poids constant.

Le degré de délitescence (DD) est exprimé en pourcentage pour 100 g de matière sèche (couscous sec), il est donné par la relation suivante :

$$DD (\%) = (ES \times 10 \times 100) / (100 - H)$$

Où, ES est la masse du résidu sec (g) issu du filtrat et H est la teneur en eau du couscous sec.

5.3.3. Temps de cuisson

Selon les travaux de [Yousfi \(2002\)](#), la cuisson du couscous réhydraté à la vapeur d'eau consiste en deux cuissons consécutives ; la première et la deuxième cuisson. Les temps de cuisson du couscous sont déterminés par chronométrage (min) et peuvent être présentés comme suit :

- Le temps minimal : il est déterminé visuellement, quand le flux de vapeur apparaît à la surface du couscous.
- Le temps optimal : il est obtenu en additionnant les deux temps de cuisson (première et deuxième cuisson). A ce temps, les grains de couscous sont individualisés et présentent une certaine tendreté.
- Le temps maximal : il est obtenu lorsque la surcuisson est atteinte. A ce stade, il y'a formation des mottes suite à une saturation à la vapeur d'eau des surfaces des grains de couscous tout en développant l'aspect collant entre les grains.

5.3.4. Détermination des indices de gain en masse et en volume

Les indices de gain en masse (IGM) et en volume (IGV) ont été déterminés après la cuisson des couscous secs à la vapeur d'eau. L'IGM et l'IGV ont été calculés suivant les formules ci-dessous et les résultats sont exprimés en pourcentage ([Demir et al., 2010](#)).

$$IGM (\%) = \frac{\text{masse Cc} - \text{masse Cs}}{\text{masse Cs}} \times 100$$

$$IGV (\%) = \frac{\text{volume Cc} - \text{volume Cs}}{\text{volume Cs}} \times 100$$

Où « Cc » et « Cs » sont le couscous cuit et le couscous sec respectivement.

5.4. Evaluation de la qualité sensorielle

Les analyses sensorielles se sont déroulées selon les recommandations de [Watts et al. \(1991\)](#). Deux tests ont été réalisés sur les couscous cuits ; le test de classement par rang et le test hédonique. Pour la préparation du couscous cuit, la cuisson des couscous secs s'est déroulée suivant la méthode décrite dans la partie enquête sur la préparation du couscous.

Le panel est constitué de 24 sujets semi-entraînés ; enseignants chercheurs et étudiants en postes graduation de l'Institut de Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaire (I.N.A.T.A.A.) de l'Université frères Mentouri Constantine 1. Ils sont recrutés selon leur motivation et leur disponibilité pour participer au test. Il leur est montré la façon dont les bulletins seront remplis. Nous avons évité de discuter de l'aliment qui sera soumis aux essais, en expliquant la méthode et les protocoles d'analyses utilisées, pour réduire la confusion et rendre la tâche plus facile aux dégustateurs. Il est important qu'ils comprennent bien les procédures utilisées et la façon de remplir les cartes de notation afin de participer aux essais sur la même base.

Il a été recommandé aux dégustateurs d'éviter l'utilisation de produits à l'odeur prononcée, comme les savons, les lotions et les parfums avant de participer à un panel et d'éviter de manger, de boire ou de fumer au moins 30 minutes avant de procéder à la dégustation.

5.4.1. Test de classement par rang

Ce test a pour objectif de déterminer la mesure dans laquelle le consommateur accepte un produit. L'acceptation d'un produit alimentaire indique en général la consommation réelle de ce produit (achat et consommation).

Description de la tâche des dégustateurs : On demande aux dégustateurs de classer par rang des échantillons codés en fonction de l'acceptation en allant du moins acceptable au plus acceptable. En règle générale, on ne permet pas les égalités.

Présentation des échantillons : Cinq échantillons ont été présentés dans des contenants identiques, codés avec des numéros aléatoires à 3 chiffres. Chaque échantillon a un numéro distinct. Tous les échantillons sont présentés simultanément à chaque dégustateur dans un ordre prévu à l'avance ou au hasard, et ils ont droit de goûter plusieurs fois les échantillons. Le bulletin à remplir pour le classement par rang de l'acceptation est donné dans l'annexe 2.

Analyse des données : Aux fins de l'analyse des données, on fait le total des classements attribués à chaque échantillon. On procède ensuite à la détermination de la signification des différences en comparant les totaux des classements pour toutes les paires possibles des échantillons en se servant du test de Friedman. Les différences entre toutes les paires possibles des classements totalisés sont comparées à la valeur critique lue sur la table donnée dans l'annexe 3 pour un niveau de signification de 1 %.

5.4.2. Test hédonique

Dans cette étude, nous avons suivi une démarche de réalisation des profils sensoriels, et nous nous sommes intéressés à l'analyse réelle des échantillons sur la base de la liste des descripteurs décrits par (Guezlane et Senator, 1985 ; Debbouz *et al.*, 1994 ; Debbouz et Donnelly, 1996; Benatallah, 2009 ; Demir *et al.*, 2010 ; Abecassis *et al.*, 2012 ; Bonnan-White *et al.*, 2013 ; Demir et Demir, 2016). Les attributs pris en considération sont la couleur, l'odeur, le collant, la fermeté et l'appréciation globale.

Description de la tâche des dégustateurs : On demande aux dégustateurs d'évaluer des échantillons codés en indiquant leur degré d'appréciation sur une échelle à 10 niveaux. Pour cela, ils indiquent une catégorie sur une échelle qui va de «aime beaucoup» qui correspond à une note de 10 à «n'aime pas du tout» qui correspond à une note 1.

Présentation des échantillons : Les échantillons sont présentés dans des contenants identiques codés avec des numéros aléatoires à 3 chiffres. Chaque échantillon doit avoir un numéro distinct. Les échantillons sont présentés simultanément pour faciliter l'administration du test et permettre aux dégustateurs de réévaluer les échantillons s'ils le souhaitent et de faire des comparaisons entre eux. Le bulletin pour les tests hédoniques est donné dans l'annexe 4.

Analyse des données : Les notations de chaque échantillon sont présentées sous forme de tableaux et analysées au moyen de l'analyse de variance (ANOVA) à seuil de signification de 0,05 à l'aide du logiciel statistique Minitab 16.0 (Minitab Inc., State College, PA, USA) pour déterminer s'il y a des différences significatives dans le degré d'appréciation moyen entre les échantillons.

6. Traitement des résultats et analyses statistiques

Dans ce travail, toutes les mesures ont été réalisées en triple. L'ensemble des analyses statistiques réalisées dans ce travail a été effectué à l'aide d'un logiciel statistique Minitab 16.0 (Minitab Inc., State College, PA, USA).

L'analyse de variance (ANOVA) à un facteur est réalisée et suivie du test post-hoc de Tukey HSD pour analyser la signification des différences entre les groupes homogènes à un seuil de signification de 0,05. Le test de corrélation a été également réalisé pour déterminer les relations entre les conditions de fabrication et les qualités des produits finis.

Pour une meilleure visualisation de la variabilité entre les différents agglomérats obtenus en fonction de leurs caractéristiques et de ceux de leurs matières première, des analyses en

composantes principales (ACP) ont été réalisées à l'aide du logiciel statistique XLSTAT (Version 2009.1.01. Addinsoft®). Cette analyse factorielle permet également la réalisation des tests des corrélations *Person (n)* pour visualiser les éventuelles corrélations entre les caractéristiques des farines et semoules et celles des agglomérats humides et des couscous secs.

Résultats et discussion

Partie I

Enquête sur la fabrication, la préparation
et la consommation du couscous artisanal

Partie I. Enquête sur la fabrication, la préparation et la consommation du couscous

1. Présentation des personnes enquêtées

Durant l'enquête menée dans la région Nord-Est de l'Algérie, 517 ménages ont répondu au questionnaire, les caractéristiques et la structure sociodémographique de la population enquêtée sont consignées dans le tableau 8. Toutes les fabricantes sont responsables des tâches ménagères et notamment de la fabrication et de la préparation du couscous.

L'âge des enquêtées varie entre 23 et 78 ans, elles étaient réparties en trois tranches d'âge ; âgées moins de 40 ans, âgées entre 40 et 60 ans et âgées de plus de 60 ans. Il s'avère que les fabricantes jeunes représentaient un pourcentage de 35 % et celles de la tranche d'âge de 40 à 60 ans représentent la moitié (50 %) de la population enquêtée et 15 % étaient des veilles dames âgées de plus de 60 ans. Pour le niveau d'instruction, il ressort que 23 % des ménages enquêtés sont illettrés, 47 % ont un niveau d'instruction primaire ou secondaire et le reste, soit 30 % sont des universitaires. La plus part des enquêtées sont des femmes non actives (femmes au foyer) avec un pourcentage de 59 % et le reste soit 41 %, représente des femmes actives en dehors du foyer. L'expérience des personnes enquêtées a été un facteur pris en considération lors de la réalisation de l'enquête, et nous l'avons jugé très déterminant par rapport à la qualité des informations recherchées à travers cette enquête. Le traitement des données collectées montrent que 87 % des enquêtées ont une expérience de plus de 10 ans dans la fabrication artisanale et la préparation du couscous.

Ces résultats pourraient être en faveur de la pertinence et de la précision des données collectées ; une enquêtée âgée de plus de 40 ans avec une expérience de plus de 10 ans dans la fabrication et la préparation du couscous, avec un niveau d'instruction primaire, secondaire ou universitaire et responsable des tâches ménagères pourra être une source d'informations précises et la plus complète possible.

Tableau 8. Caractéristiques et structure sociodémographique de la population enquêtée

($N_{total}=517$)

Population enquêtée	Nombre (%)
Tranche d'âge (année)	
23-40	181 (35)
40-60	259 (50)
60-78	077 (15)
Niveau d'instruction	
Illettrées	119 (23)
Primaire/secondaire	243 (47)
Universitaire	155 (30)
Activité	
Active	212 (41)
Non active	305 (59)

2. Informations générales

Les résultats issus de l'enquête montrent que les quantités de semoule achetée varient d'un ménage à un autre. La majorité des enquêtées (88 %) ont déclaré qu'elles achètent 25 kg/mois de la semoule de blé dur, cette dernière est en grande partie destinée à la fabrication du couscous artisanal.

Le choix de la matière première (semoule de blé dur) destinée au roulage n'est pas arbitraire selon les déclarations des enquêtées. La semoule doit répondre à un certain nombre de critères qui sont généralement basés sur le type, la granulométrie et la couleur de la semoule. La taille des particules élémentaires d'une semoule (granulométrie) représente un critère de choix pour la plus part des enquêtées (90 %). Il a été déclaré que la semoule doit être d'une granulométrie moyenne contenant en même temps un mélange de semoule grosse et fine. Il a été noté également que les fabricantes enquêtées donnent beaucoup d'attention au type de la matière première ; la semoule supérieure est la plus appropriée pour la fabrication d'un bon couscous. Cependant, la semoule courante est utilisée par beaucoup d'autres ménagères et ce

pour des raisons économiques. En plus de la granulométrie et du type, la couleur s'ajoute comme un troisième critère de choix de la semoule. Une semoule jaune claire est toujours préférée par les fabricantes du couscous artisanal. Elles indiquent qu'une semoule brunâtre donne un couscous de couleur sombre moins attractive.

En plus de la semoule de blé dur, d'autres semoules et farines sont parfois utilisées pour la fabrication du couscous artisanal. Il a été signalé par certaines enquêtées (40 %) que la fabrication du couscous avec de la farine d'orge est une pratique très courante justifiée par les effets bénéfiques pour la santé et même les préférences gustatives que présente l'orge. De plus, les farines sans gluten n'ont pas été exclues. Quelques enquêtées (3 %) ont parlé de la fabrication des couscous sans gluten en utilisant des farines de maïs, de petit pois ou encore du millet appelé localement « *d'ra* ». Ces déclarations ont été accompagnées par des témoignages sur la difficulté de la transformation de ces farines en couscous contrairement à la semoule de blé dur.

Les données de l'enquête dans la région Nord-Est de l'Algérie montrent que la plus part des femmes enquêtées (75 %) fabriquent le couscous artisanal une fois par an tout en assurant la quantité suffisante pour la consommation de l'année. Si le stock en couscous est épuisé avant la date prévue, dans ce cas, les ménagères (14 %) procèdent une deuxième fabrication pour assurer les besoins de l'année. Par ailleurs, des enquêtées (11 %) ont mentionné qu'elles fabriquent une quantité suffisante du couscous pour la consommation du jour même.

3. Etapes de la fabrication du couscous artisanal

Les informations relatives au procédé de fabrication artisanale du couscous ont été collectées lors des interviews. Elles nous ont permis d'identifier les différentes étapes et les pratiques qui caractérisent chacune d'elles et le tout est résumé sous forme d'un diagramme de fabrication artisanale du couscous dans la région Nord-Est de l'Algérie (Figure 20).

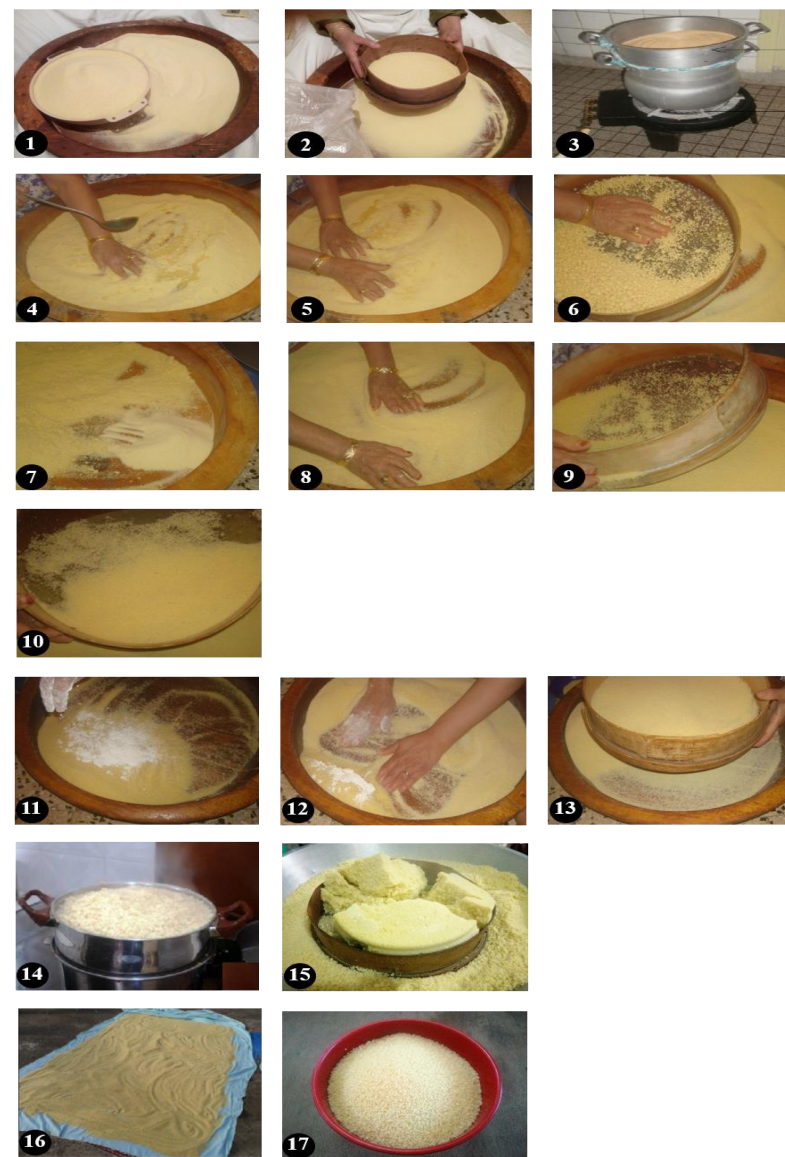
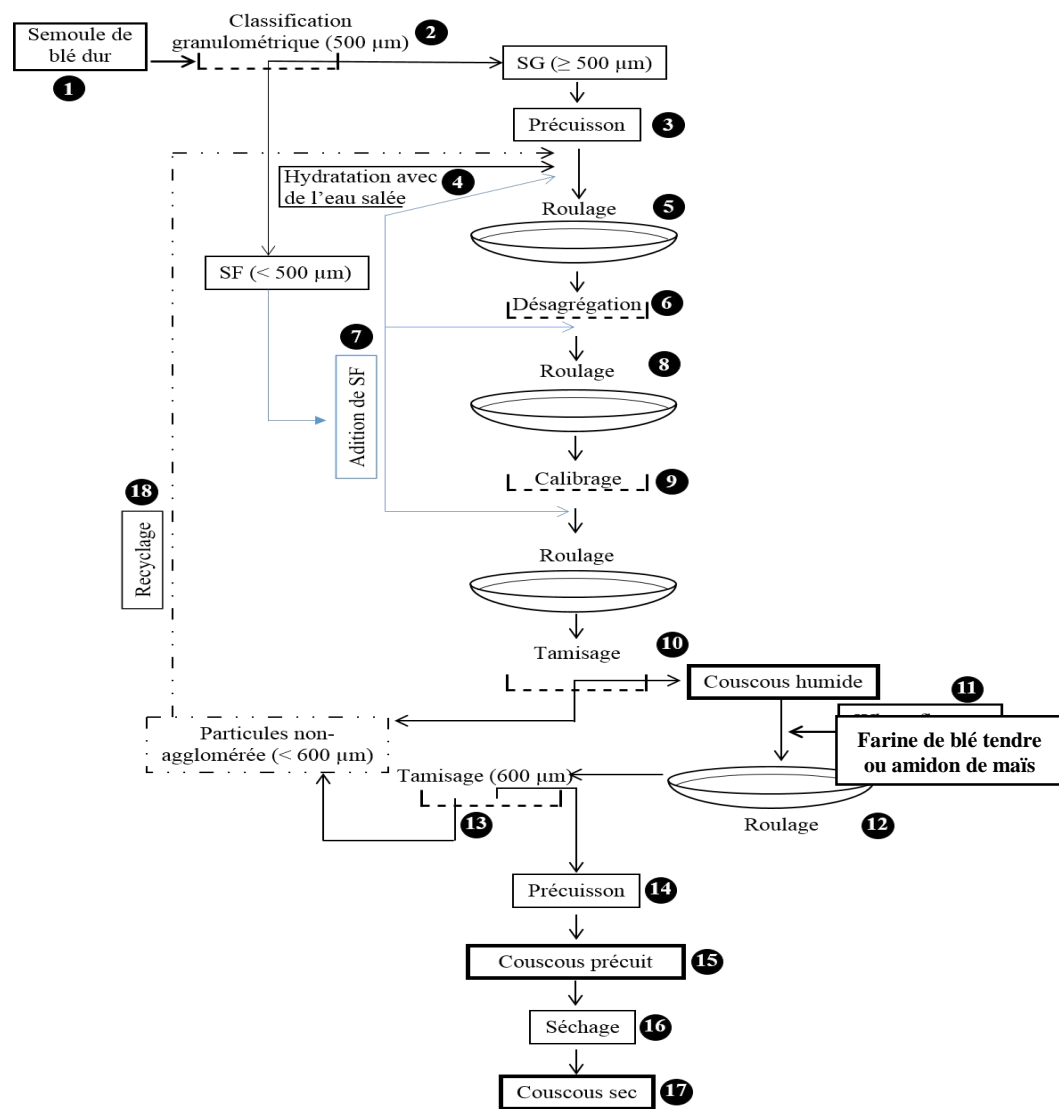


Figure 20. Diagramme de fabrication artisanale du couscous identifié à travers l'enquête menée auprès de 517 ménages du Nord-Est de l'Algérie

3.1. Préparation et classification de la semoule

La semoule telle qu'achetée (étape 1) doit faire l'objet d'un classement dimensionnel (étape 2). Ensuite, elle est précuite à la vapeur d'eau (étape 3) pour qu'elle soit prête à l'utilisation dans le procédé de fabrication. Comme cité ci-dessus, dans la majorité des cas c'est la semoule grosse moyenne qui est utilisée pour la fabrication du couscous. Les semoules ne contenant que la fraction grosse sont généralement à éviter de peur qu'elles donnent des grains de couscous trop gros et celles ne contenant que la fraction fine, risquent de donner un faible rendement au roulage. De ce fait, elles sont orientées vers la fabrication d'autres produits tels que *trida* et les crêpes.

Comme son nom l'indique, la semoule grosse moyenne contient la fraction grosse et la fraction fine. Pour cette raison, la plus part des ménagères (80 %) préfèrent séparer entre les deux fractions grosse et fine à l'aide d'un tamis dit *dekkak* de mailles correspondant à 500 μm . Il est à noter que le roulage se fait avec une quantité de semoule grosse supérieure (SG) à celle de la semoule fine (SF) et le rapport SG/SF est toujours supérieur à 1. C'est pourquoi à l'inverse du procédé industriel, la fabrication artisanale sépare dès le début les deux fractions granulométriques. D'autres ménagères (20 %) ont déclaré que l'étape de classification n'est pas assez nécessaire en raison de l'homogénéité de la granulométrie et l'absence des fractions importantes de la semoule fine, donc la semoule est utilisée telle qu'elle sans aucune classification préalable.

Après la séparation de la semoule fine et de la semoule grosse, cette dernière est précuite avec de la vapeur d'eau sur un couscoussier pendant 10 à 14 minutes. Cette opération semble avoir pour objectif l'amélioration des propriétés d'agglomération de la semoule en favorisant la formation des agglomérats et non pas des amas de pâte.

3.2. Hydratation

L'hydratation de la semoule (Etape 4) est une étape très importante et assez délicate. Pour sa maîtrise, il faut garantir un mouillage homogène de la semoule en contrôlant le volume d'eau ajoutée ; un excès favorise une agglomération exagérée aboutissant à la formation d'une pâte qui peut compromettre l'étape de roulage.

D'après les résultats de l'enquête, il apparaît que la salinité de l'eau d'hydratation pourrait influencer la qualité du couscous. Les fabricantes qui hydratent avec une eau salée représentaient 87% des enquêtées, et les concentrations du sel de table (NaCl) dans l'eau potable ont été estimées à 1,6 % (g de sel/ 100 g d'eau d'hydratation). Leur choix est en général justifié par l'amélioration de la saveur du produit et une meilleure conservation contre les altérations lors du stockage et certainement une grande aptitude au séchage.

L'ajout du sel dans l'eau d'hydratation modifie ses caractéristiques de tension de surface et d'angle de contact qui influencent largement le mécanisme d'agglomération humide des semoules. Il a été montré dans les travaux d'Aulton et Banks (1979) que plus l'angle de contact diminue, la mouillabilité augmente et la distribution de taille se resserre. De même, la taille moyenne des agglomérats diminue avec la diminution de la mouillabilité lorsque l'angle de contact augmente.

La compacité des agglomérats formés s'intensifie avec l'augmentation de la tension de surface du liquide du mouillage mais la diminution de la tension de surface engendre la formation d'agglomérats fragiles et déformables (Iveson *et al.*, 2001). Par contre, Ouchiyaama et Tanaka (1980) ont rapporté que la diminution de la tension de surface peut augmenter le taux de consolidation en les particules élémentaires pendant le procédé d'agglomération humide.

Dans le cas où le liquide d'hydratation est une eau douce, les ménagères procèdent à l'ajout du sel dans la semoule avant son hydratation, ou encore systématiquement dans le couscous lors de sa préparation à la consommation.

L'opération de l'hydratation se fait dans un récipient qui peut être en bois, en terre cuite ou en encore en métal appelé *guesâa* en arabe ou *thavakith* en Tamazight. L'arrosage de l'eau d'hydratation sur le lit de semoule se fait progressivement avec de petits volumes à l'aide d'une louche ou à la main.

3.3. Roulage calibrage

Après la collecte et l'analyse des données concernant l'étape de roulage calibrage (Etape 5), nous avons constaté qu'elle se déroule en trois opérations : la grenaison, la mise en forme et la finition (Figure 20).

3.3.1. Etape de grenaison

Le roulage débute juste après l'arrosage du lit de la semoule avec l'eau d'hydratation. Il consiste en des mouvements circulaires et de va-et-vient avec les doigts demi fléchis afin de répartir d'une façon homogène l'eau d'hydratation dans le lit de semoules. Selon les enquêtées, la semoule fine est ajoutée progressivement par saupoudrage. Son rôle est de faciliter la formation des premiers agglomérats. Les fines particules commencent à absorber l'eau d'hydratation, et vont aider à amorcer l'agglomération humide en donnant les ébauches des agglomérats appelés les nucléi (Figure 21).

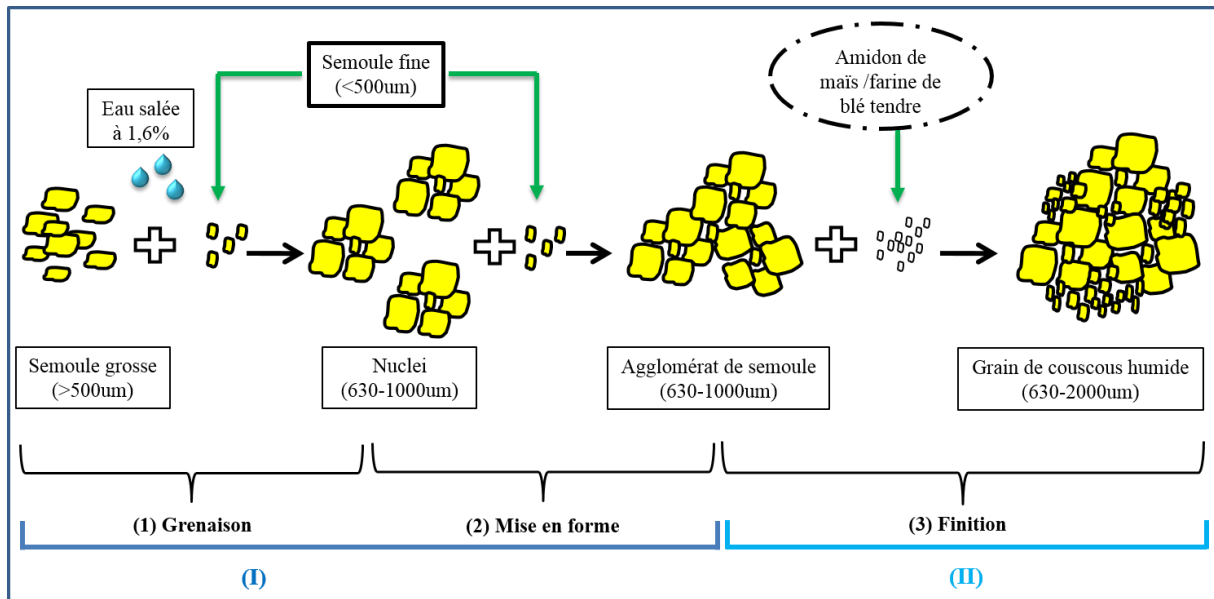


Figure 21. (I) Rôle de la semoule fine dans le mécanisme d'agglomération, (II) Rôle de l'amidon de maïs/farine de blé tendre dans l'étape de finition du couscous artisanal

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont attesté que la présence de fines particules de semoule pourrait affecter la cinétique d'agglomération. [Murrieta-Pazos et al. \(2014\)](#) ont indiqué qu'en présence des grains de taille réduite, l'ensemble des forces de liaisons entre les particules semble être favorisé. Pendant l'agglomération humide, le liant diffuse facilement dans les fines particules et provoque l'évolution des matrices protéiques donnant lieux à des ponts visqueux. Le liquide d'hydratation interagit parallèlement avec de l'amidon, ce dernier se trouve beaucoup plus sous l'état d'un amidon endommagé dans les poudres amylicées finement broyées, l'absorption du liquide d'hydratation et le gonflement prennent effet ce qui facilite l'agglomération ([Galiba et al., 1988](#); [Mohamad Saad et al., 2009](#)).

3.3.2. Etape de mise en forme

Les grains primaires qui ont été formés lors de l'étape d'hydratation sont nourris par l'addition de la semoule fine ou la semoule entière. A ce niveau, un roulage est effectué en appliquant une certaine force avec une grande pression du plat des mains et selon un mouvement répété de va-et-vient sur les particules mises en action. Les particules de la semoule fine sont soudées et adhérentes aux grains primaires du couscous (nucléi) qui donneront à leur tour des agglomérats de plus grande taille par effet boule de neige ou coalescence.

La raison fondamentale de l'adjonction d'une semoule de telle granulométrie peut trouver son explication dans les travaux de [Barkouti \(2012\)](#) où il a été démontré que les particules de semoules fines hydratées forment un ciment qui remplit facilement les vides présents entre les grosses

particules. Ainsi, ce ciment adhère mieux aux grains de couscous préformés ce qui donne des grains ronds et lisses. L'addition de semoule fine au roulage favorise la cohésion des différentes particules du grain de couscous et lui confère une forme ronde. L'opération de l'addition de la semoule au roulage est refaite deux à trois fois afin de garantir que la semoule a absorbé toute l'eau d'hydratation et de permettre une bonne cohésion entre les particules de semoule.

Les petits grumeaux ayant pris naissance précédemment, subissent un désagrégage (Etape 6) sur un tamis de 2860 à 3300 μm . L'objectif de cette opération est de réduire la taille des agglomérats en les forçant à passer à travers les mailles du tamis avec l'ajout de petites quantités de la semoule fine pour réduire l'aspect pâteux des grumeaux.

Après le désagrégage, le passant est additionné de petites quantités de semoule fine (Etape 7), roulé et retravaillé plusieurs fois de suite (Etape 8). C'est à ce niveau que le calibrage est effectué (Etape 9), il consiste en une réduction de la granulométrie des agglomérats humides de couscous en les faisant passer à travers un tamis de mailles de 1400 à 1610 μm et la taille désirée des particules du couscous humide est obtenue (Etape 10). Une petite quantité de semoule résiduelle reste non agglomérée et doit être séparée des grains de couscous humide à l'aide d'un tamis de 600 μm pour l'orienter vers le recyclage et le couscous humide (refus du tamis) subira une opération dite « finition ».

3.3.3. Etape de finition

C'est une opération de roulage des grains de couscous humide répétée plusieurs fois de suite, sans ajout d'eau mais avec un saupoudrage de la farine de blé tendre ou de l'amidon de maïs (Etape 11-12). Les personnes interviewées ont déclaré que les quantités de farine de blé tendre ou de l'amidon de maïs ajoutées varient entre 8 et 12 g/100 g de couscous humide. Selon les enquêtées, l'utilisation de la farine de blé tendre et de l'amidon de maïs est un moyen qui permet l'homogénéisation et l'amélioration de la qualité des grains de couscous en leur donnant une forme plus arrondie, une surface plus lisses et des grains bien individualisés, d'où le nom de finition qui donne un produit que nous appelons le couscous humide. Le rôle de l'ajout de l'amidon de maïs ou de la farine de blé tendre dans l'étape de finition a été schématisé dans la figure 21.

Le recyclage (Etape 18) des particules résiduelles non agglomérées passant du tamis (Etape 13) se fait par une réintroduction à nouveau au début d'opération du roulage ; elles sont hydratées, additionnées de semoule fine, roulées et suivent toutes les étapes de tamisage et calibrage jusqu'à l'obtention du couscous humide. Le recyclage est répété jusqu'à l'épuisement maximal de la matière.

L'opération du roulage doit s'arrêter à un certain moment. Pour cela, des critères de base ont été avancés par les enquêtées. La tendance des ménagères à évaluer la fin de roulage est principalement basée sur la formation des grains lisses, fermes et homogènes, l'absence de particules de semoules non agglomérée et de grumeaux. Il a été déclaré qu'il est impossible de transformer toute la semoule en grains de couscous, et un rendement au roulage de 100 % ne peut jamais être obtenu quels que soient l'expérience, le savoir-faire et le matériel utilisé. Il y aura toujours une fraction de semoule non roulée à la fin d'opération du roulage qui sera orientée pour la fabrication d'autres plats traditionnels.

3.4. Précuisson

La précuisson est une opération hydrothermique par le biais de la vapeur d'eau (Etape 14). Le couscous humide est mis dans un couscoussier adapté au-dessus d'une marmite contenant de l'eau bouillante. La vapeur d'eau dégagée va entrer en contact avec les grains du couscous humide et les précuire.

La précuisson contribue à l'amélioration de la digestibilité et au maintien de la forme agglomérée des grains de couscous par gélatinisation de son amidon (Guezlane *et al.* 1998b) et coagulation des protéines (Guezlane *et al.* 1998a) tout en évitant l'agglomération et le collant des particules de couscous au cours de la prochaine réhydratation (Yousfi, 2002 ; Abecassis *et al.*, 2012). Il est à noter également que la précuisson pourra être un moyen préventif contre l'altération du couscous sec, grâce à la réduction de la charge microbienne par élimination de certaines bactéries en forme végétative et à la destruction de certaines enzymes (Ziane *et al.*, 2014 ; 2018).

Cette opération est immédiatement réalisée une seule fois avant le séchage par 77 % des enquêtées, et 23% de ménagères passent directement à l'étape de séchage sans avoir recours à cette étape du traitement hydrothermique. Selon les réponses obtenues, la fin de la précuisson est évaluée majoritairement par l'apparition de la vapeur d'eau à la surface du couscous et le changement de couleur blanche qui vire au jaune ambré. Cette opération dure généralement 8 à 14 minutes. A la fin de la précuisson, l'émottage manuel doit se faire immédiatement et à chaud pour une bonne séparation des grains précuits. Après refroidissement, cette opération devient difficile.

Ensuite, le produit est calibré à travers un tamis de manière que tous les grains de couscous doivent passer à travers les mailles de ce tamis afin de bien séparer les grains de couscous précuit (Etape 15) qui seront orientés vers l'étape du séchage.

3.5. Séchage

Avant d'être conditionné et stocké, le couscous précuit subit un séchage à l'air libre en l'étalant sur des draps en couches fines (Etape 16). Quelques différences ont été constatées d'une fabricante à une autre en termes de mode et de durée du séchage.

Le séchage peut se faire exclusivement à l'ombre ce qui réduit l'exposition du couscous précuit à la lumière du soleil et aux températures trop élevées, qui sont des facteurs pouvant provoquer l'altération de la qualité nutritionnelle et organoleptique du produit fini. Certaines fabricantes jugent que le séchage à l'ombre prend plus de temps et le couscous est plus exposé aux facteurs d'altération et de souillures. Le séchage au soleil leur semble plus rapide et plus efficace pour une réduction maximale de l'humidité du couscous, mais il peut entraîner un brunissement et un goût étranger au produit ce qui limitera son stockage.

En plus des deux modes de séchage (exclusivement au soleil ou à l'ombre), il a été relevé qu'un séchage mixte est adopté par la plus part des fabricantes. Il s'agit d'une combinaison entre les deux modes du séchage en commençant par le séchage à l'ombre et finir avec le séchage au soleil. D'après les enquêtées, le séchage à l'ombre permet la préservation des qualités du couscous et la seconde garantie un séchage optimal. Dans ce sens, [Rahmani et Muller \(1996\)](#) ont rapporté que le séchage au soleil peut induire des pertes en certaines vitamines comme la riboflavine (vitamine B2). Quant à la durée du séchage, elle varie en fonction des conditions climatiques comme la température saisonnière et la durée d'ensoleillement. Elle est d'une moyenne de 96 heures du début jusqu'à la fin du séchage.

A la fin du séchage, le produit obtenu constitue le couscous sec (Etape 17). Ce dernier est repris au tamis de mailles de 500 µm pour enlever les résidus de particules non agglomérées constitués principalement de la semoule fine, de la farine de blé tendre ou d'amidon de maïs. Ensuite, dans certains cas, un tri granulométrique peut se faire par un dernier calibrage pour récupérer le couscous fin (*mesfouf*) de granulométrie inférieure à 720 µm.

3.6. Conditionnement et stockage

Les conditions de stockage du couscous sec doivent être bien choisies afin de garantir sa longue conservation. Elles doivent tenir compte de certains paramètres, y compris l'endroit où le produit est placé, son emballage et les produits ajoutées.

Après séchage, le couscous sec est conditionné dans des sacs en toile et déposé dans un endroit sec loin d'humidité à température ambiante. Pour prolonger sa durée de stockage et améliorer sa

qualité organoleptique, les ménagères ajoutent au couscous sec certains produits comme le poivron noir à gros grains, le piment rouge et le laurier.

Dans de bonnes conditions de conservation, la durée de stockage du couscous sec peut aller d'une année jusqu'à 5 ans. Dans la plus part des cas, les stocks en couscous sec s'épuisent bien avant son altération.

4. Préparation du couscous

4.1. Conduite de la réhydratation du couscous sec

Les informations collectées durant l'enquête montrent que la préparation du couscous pour la consommation commence par la réhydratation. Le couscous sec est trempé dans l'eau pendant quelques minutes puis égoutté dans un couscoussier. Par la suite, le couscous en cours de réhydratation est laissé au repos pendant environ 10 minutes, remué et dispersé de temps en temps. Enfin, le couscous réhydraté est additionné de matière grasse afin d'éviter le développement de l'aspect du collant pour obtenir des grains de couscous bien individualisés après la cuisson. Il a été noté que les huiles végétales telles que l'huile de table et l'huile d'olive sont les plus utilisées à cette fin.

Parmi les objectifs de la réhydratation, nous pouvons citer le ramollissement de la texture du grain du couscous. Ceci favorisera le transfert de chaleur et de matière pendant la cuisson à la vapeur d'eau et permet une cuisson optimale.

4.2. Cuisson du couscous réhydraté

Le couscous réhydraté est versé dans un couscoussier placé sur une marmite contenant de l'eau bouillante ou la soupe avec laquelle le couscous sera consommé. Les personnes enquêtées ont témoigné que le couscous cuit par la vapeur d'eau issue de la soupe sera d'une qualité gustative meilleure et cela en raison des composés volatiles entraînés avec la vapeur d'eau.

Plusieurs critères ont été listés pour l'évaluation de la fin de la cuisson. La montée de la vapeur d'eau à la surface du couscous a été considérée par 49 % des enquêtées, le virage de couleur au jaune clair par 35 % des enquêtées, l'attendrissage des grains du couscous et l'augmentation du volume de la masse cuite.

Par la suite, le couscous est émotté à chaud et aspergé de petites quantités d'eau. Plusieurs types de matières grasses peuvent être ajoutés à ce niveau ; nous pouvons citer les huiles de table (54 %), la margarine (39 %), le beurre fondu appelé également *dehane* en berbère (35 %) et l'huile d'olive (9 %). Le choix de la matière grasse ajoutée est basé sur la disponibilité et les occasions

de consommation du couscous (le couscous préparé durant les fêtes est additionné du beurre fondu). Après l'ajout de la matière grasse, le couscous cuit une seule fois est laissé au repos pour environ 15 minutes puis cuit pour une deuxième fois. Cependant, certaines enquêtées (11 %) ont mentionné qu'elles cuisent le couscous pour une troisième fois et disent que deux cuissons ne sont pas suffisantes.

5. Consommation du couscous

Les résultats relatifs aux habitudes socioculturelles liées aux modes de consommation du couscous ont montré que le couscous est consommé sous différentes formes, mais le plus connu c'est qu'il est consommé avec une sauce aux légumes. Cette dernière est souvent préparée avec des légumes, des légumineuses et différents types de viandes, ce qui fait du plat du couscous le plus complet possible.

Les légumes utilisés pour la préparation de la sauce sont les légumes saisonniers dont nous citons les carottes, les haricots verts, les courgettes, la pomme de terre, les navets, les cardes, les choux et la tomate. L'oignon et l'ail sont ajoutés comme des épices. Pour les légumineuses, le pois chiche reste le plus préféré. Cependant, d'autres peuvent être ajoutés à savoir les lentilles, le petit pois, les haricots, la féverole, etc. Par rapport aux viandes, les données obtenues durant l'enquête montrent que les sauces peuvent être préparées avec différents types de viandes ou produits ethniques à base de viandes rapportés par [Gagaoua et Boudechicha \(2018\)](#). Le plat du couscous est accompagné avec des viandes rouges (ovine ou bovine), des viandes de la volaille, de la viande séchée appelée *guedid* en arabe ou *achedhlouh* en berbère, des abats d'animaux (estomacs et intestins) appelés *douara*, des têtes ovines ou bovines appelés *bouzelouf*, les saucisses comme la *merguez* et même avec du poisson notamment dans les régions côtières (Bejaia et Jijel). Le couscous est de même accompagné et consommé avec des œufs durs et du sucre le jour de la fête du début du printemps qui est célébré le premier mars de chaque année (Figure 22).

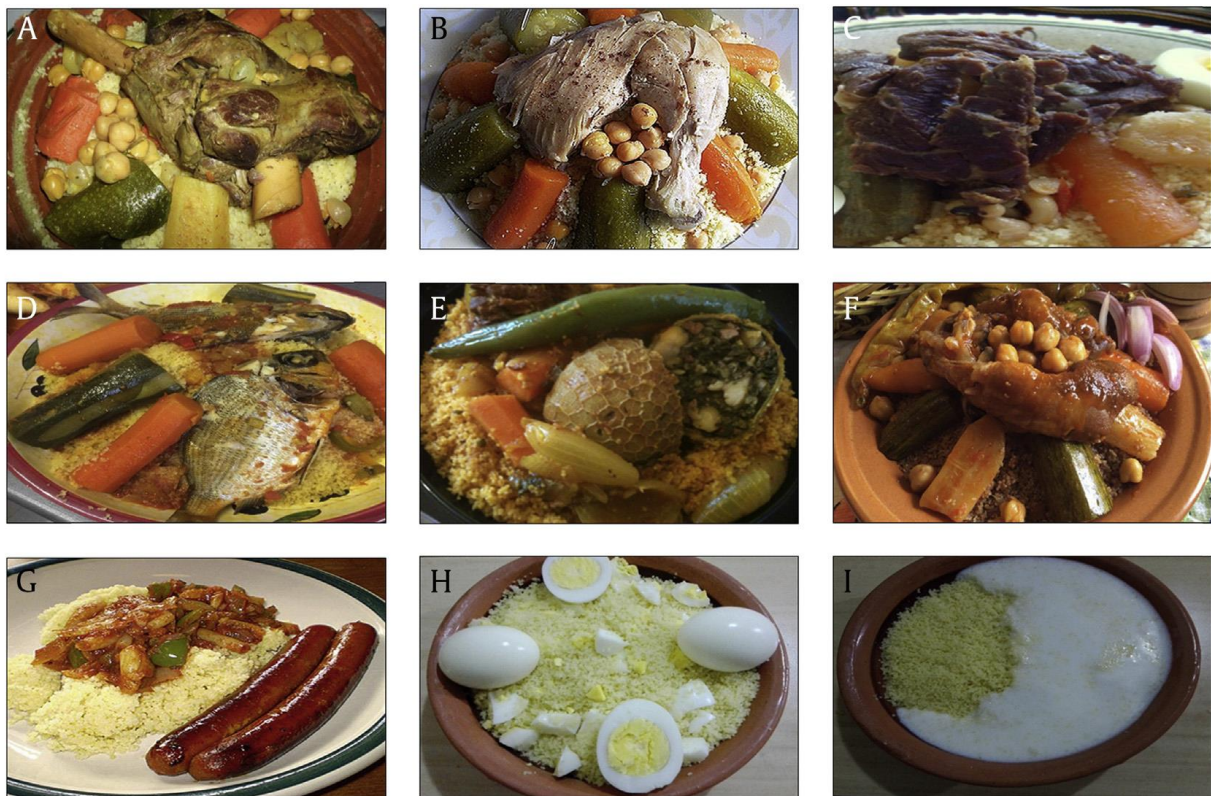


Figure 22. Photographies des plats de couscous montrant les différents types de viande, de produits ethniques à base de viande et quelques légumes utilisés pour la préparation ou la consommation de couscous avec (A) viande rouge ovine ou bovine, (B) viande de poulet, (C) guedid, (D) poisson, (E) douara, (F) bouzelouf, (G) merguez, (H) sucre et œufs durs, et (I) lait fermenté appelé (l'ben ou ighi en Berbère).

Le couscous est également accompagné avec du lait caillé (*raib*) ou du lait fermenté (*l'ben* ou *jben*) à la place de la sauce. Dans ce cas, le couscous cuit est mélangé avec des fèves ou des petits pois bouillis et d'oignon ou carrément avec des fruits comme les raisins frais ou secs et des dattes. Ce plat est connu sous le nom du *mesfouf* (Figure 23).



Figure 23. Photographies du mesfouf préparées avec (A) de la fève et du petit pois ou (B) avec des fruits comme des raisins secs et des dattes

Beaucoup d'événements et occasions ne peuvent pas passer sans préparer le plat du couscous en ces différentes variantes. Le couscous est servi durant les weekends, c'est le plat préféré chez les familles algériennes. Le couscous est également consommé durant les fêtes religieuses comme les fêtes de l'aïd (*aïd el-adha* et *aïd el-fiter*) et le mois de ramadan en raison des effets bénéfiques sur la santé des jeuneurs. En plus des fêtes religieuses, le couscous est un plat servi durant la célébration des fêtes de mariages, des banquets, de naissances, de circoncisions et aux funérailles.

Partie II

Etude de quelques pratiques adoptées durant la
fabrication artisanale du couscous

Partie II. Etude de quelques pratiques adoptées durant la fabrication artisanale du couscous

1. Caractéristiques des matières premières

Les trois poudres céréalières utilisées comme matières premières dans cette partie sont la semoule de blé dur, la farine d'orge et la farine de blé tendre. Leurs caractéristiques physiques, de microstructure et d'hydratation seront données ci-dessous.

1.1. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques incluant les teneurs en eau, les propriétés densimétriques, d'écoulement et granulométriques des trois poudres céréalières sont consignées dans le tableau 9. Les résultats obtenus montrent que la semoule et les deux farines présentent des teneurs en eau significativement différentes ($p < 0,05$). La teneur la plus élevée a été enregistrée pour la semoule de blé dur qui est de 14,76 %, suivie par la farine de blé tendre (13,23 %) et la farine d'orge avec la teneur en eau la plus faible (12,11 %). Les teneurs en eau citées ci-dessus sont semblables à celles citées dans la littérature ; 14,20 % pour la farine de blé tendre (Saad *et al.*, 2011a), 14,80 % pour la semoule de blé dur (Bellocq *et al.*, 2017a), et 11,53 % pour la farine d'orge (Drakos *et al.*, 2017).

Pour les propriétés densimétriques, il apparaît que la farine de blé tendre est significativement plus dense que la farine d'orge et la semoule de blé dur ($p < 0,05$). Pour l'espace poreux des trois poudres céréalières, les résultats obtenus montrent que la farine d'orge présente une porosité tassée significativement plus élevée par rapport à celle de la farine de blé tendre et à celle de la semoule de blé dur ($p < 0,05$). La porosité d'une poudre céréalière pourrait influencer la cinétique d'hydratation pendant l'agglomération humide, il a été mentionné dans les travaux de Berton (2002) que la structure d'un lit de poudre céréalière pourrait influencer la quantité d'eau absorbée par capillarité.

Les résultats concernant les propriétés d'écoulement montrent que l'angle de talus varie entre 45° pour la farine de blé tendre, 51,60° pour la semoule de blé dur et 71,20° pour la farine d'orge. Nous pouvons noter que la farine de blé tendre présente un écoulement massique moyen, alors que la farine d'orge et la semoule de blé dur s'écoulent beaucoup mieux. Pendant l'agglomération humide, le lit de semoule ou de farine est soumis à des mouvements de roulage et du mélange avec l'eau d'hydratation. Un écoulement faible pourrait présenter une limite d'une bonne distribution du liquide du mouillage dans le lit de la poudre céréalière.

Tableau 9. Propriétés intrinsèques de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre

Poudres céréalières	Semoule de blé dur	Farine d'orge	Farine de blé tendre
Teneur en eau (g/100 g m.s.)	14,76 (\pm 0,11) ^a	12,11 (\pm 0,37) ^c	13,23 (\pm 0,59) ^b
Propriétés densimétriques			
Densité aérée (g/cm)	0,674 (\pm 0,01) ^a	0,525 (\pm 0,11) ^b	0,543 (\pm 0,01) ^b
Densité tassée (g/cm)	0,772 (\pm 0,07) ^a	0,610 (\pm 0,00) ^c	0,678 (\pm 0,00) ^b
Densité vraie (g/cm)	1,459 (\pm 0,00) ^b	1,458 (\pm 0,00) ^c	1,484 (\pm 0,00) ^a
Ratio de densification RD (%)	52,94 (\pm 0,34) ^a	41,82 (\pm 0,26) ^c	45,65 (\pm 2,29) ^b
Porosité aérée ϵ_a (%)	53,79 (\pm 0,61) ^b	63,98 (\pm 0,39) ^a	63,42 (\pm 0,93) ^a
Porosité tassée ϵ_t (%)	47,06 (\pm 0,34) ^c	58,18 (\pm 0,26) ^a	54,35 (\pm 2,29) ^b
Propriétés d'écoulement			
Angle de talus (°)	51,60 (\pm 1,80) ^b	71,20 (\pm 0,50) ^a	45,00 (\pm 6,52) ^b
Écoulement massique (g/s)	3,99 (\pm 0,25) ^b	5,37 (\pm 0,02) ^a	1,18 (\pm 0,07) ^c
Indice de Carr (IC)	12,71 (\pm 1,60) ^b	13,87 (\pm 0,43) ^{ab}	19,77 (\pm 3,80) ^a
Ratio d'Hausner (RH)	1,15 (\pm 0,02) ^b	1,16 (\pm 0,01) ^{ab}	1,25 (\pm 0,06) ^a
Propriétés granulométriques			
d ₅₀ (µm)	315 (\pm 3,31) ^b	491 (\pm 2,35) ^a	70,90 (\pm 0,78) ^c
d ₁₀ (µm)	80,30 (\pm 1,51) ^a	33,80 (\pm 0,80) ^b	16,10 (\pm 0,27) ^c
d ₉₀ (µm)	578 (\pm 4,28) ^b	1090 (\pm 5,04) ^a	161 (\pm 0,92) ^c
Dispersion granulométrique (DG = [(d ₉₀ -d ₁₀)/d ₅₀])	1,58 (\pm 0,01) ^c	2,16 (\pm 0,02) ^a	2,05 (\pm 0,02) ^b

Les valeurs en ligne ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

Les distributions granulométriques des trois poudres céréalières étudiées sont présentées dans le tableau 9 et la figure 24. La semoule de blé dur présente une distribution granulométrique monomodale pendant que celles de la farine d'orge et de la farine de blé tendre sont bimodales. Les valeurs des diamètres médians (d₅₀) obtenus montrent que les particules la farine d'orge sont plus grosses (491 µm) que celles de la semoule de blé dur (315 µm). Par ailleurs, le diamètre

médian de la farine de blé tendre a enregistré la valeur la plus faible qui est de 70,90 μm avec une dispersion granulométrique (DG) de 2,05.

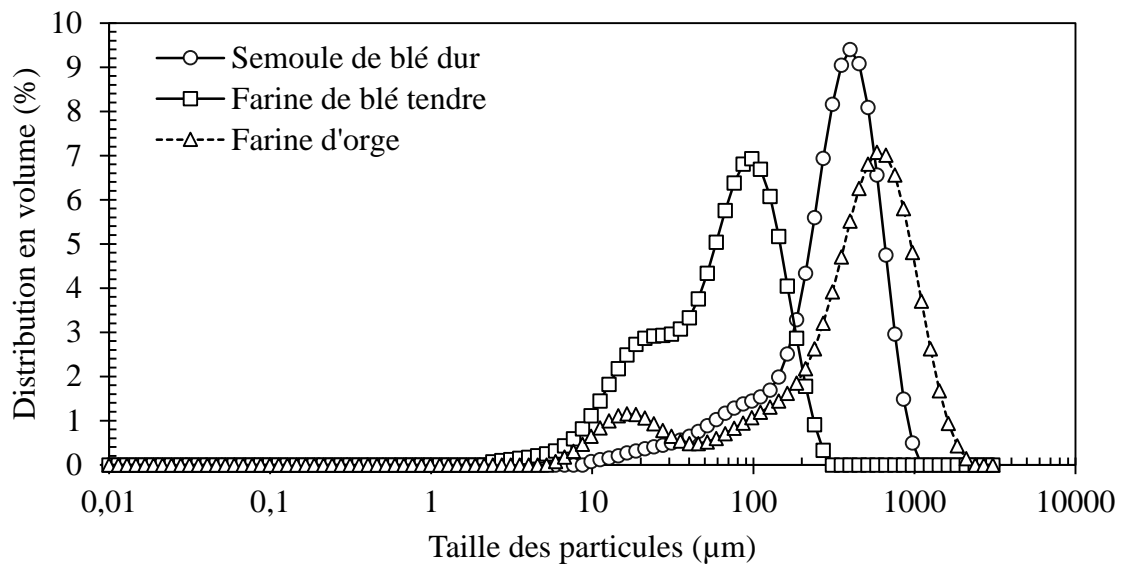


Figure 24. Distributions granulométriques de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre

1.2. Microstructure

La microstructure des particules natives et leur état de surface ont été analysés par microscopie électronique environnemental (ESEM). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 25 qui montre que la semoule de blé dur renferme peu de particules fines, et celles qui sont grosses représentent la majorité de la population des particules (Figure 25.I.SBD). Avec un grossissement plus élevé ($\times 400$), l'état de surface des particules élémentaires a pu être examiné (Figure 25.II.SBD). Il s'avère que les particules de la semoule de blé dur renferment deux populations de grains d'amidon de tailles différentes allant de 5 à 20 μm ce qui correspond aux résultats rapportés par [Soulaka et Morrison \(1985\)](#) et [Gianibelli et al. \(2005\)](#). Sur la surface des particules, des aspérités et parfois des sillons peuvent être notés. Pour la farine d'orge, il apparaît que la population des particules est très hétérogène ce qui se traduit avec une DG de 2,16 qui est significativement plus élevé ($p < 0,05$) que celui de la SBD (1,58) et de la FBT (2,05). Il est à noter également que des fragments de son et des fibres sont observés. La surface des particules de la farine d'orge est rugueuse et présente des aspérités où les grains d'amidon peuvent être visibles avec une taille allant de 11 à 15 μm . Dans la farine de blé tendre, nous pouvons remarquer que les particules fines sont les plus dominantes ($d_{90} = 161 \mu\text{m}$). Sur la surface, des grains d'amidon de forme lenticulaire sont apparents.

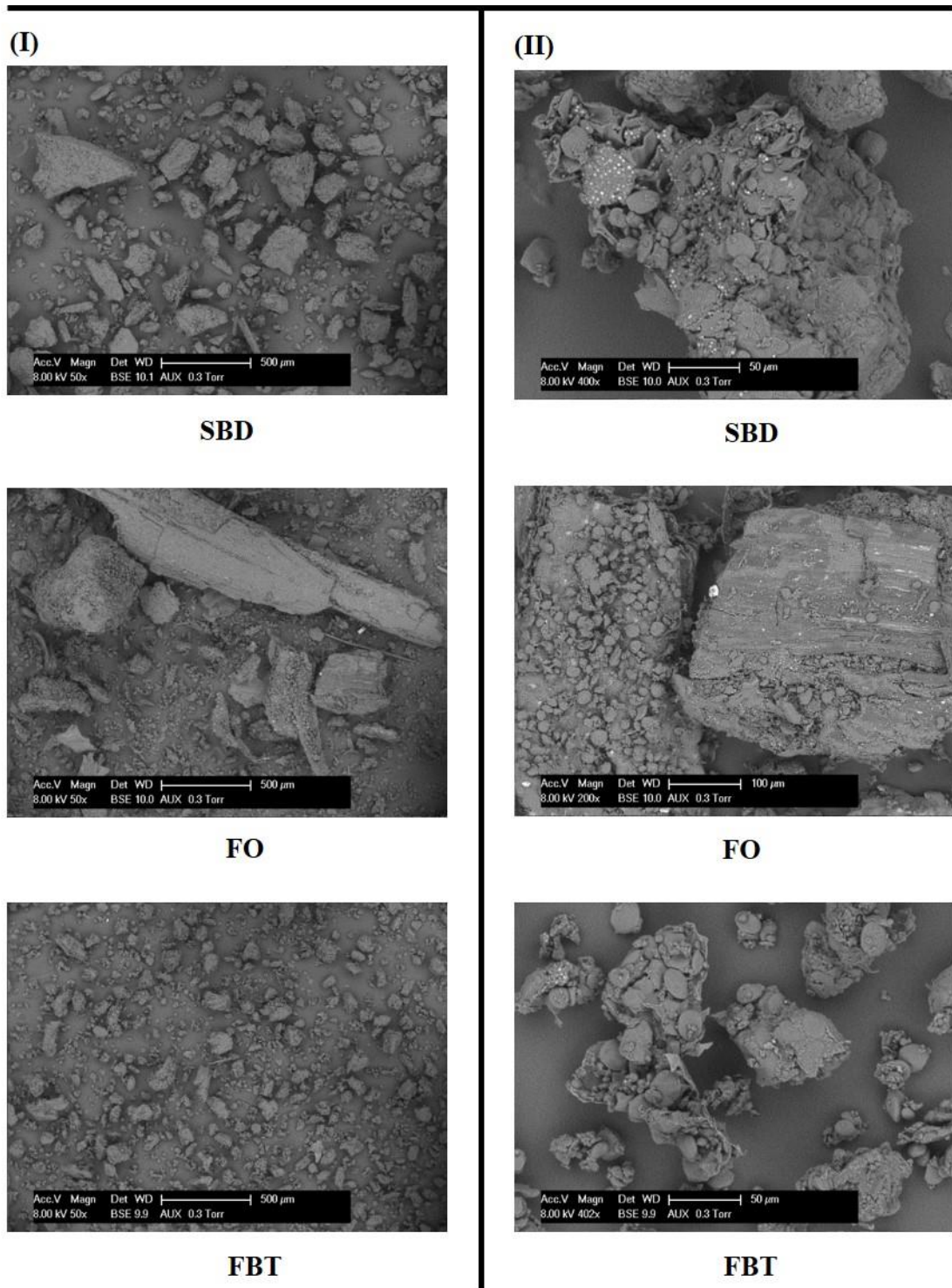


Figure 25. Microstructure des particules natives (I) et leur état de surface (II) par microscopie électronique environnemental (ESEM) des particules élémentaires de la semoule de blé dur (SBD), de la farine d’orge (FO) et de la farine de blé tendre (FBT)

1.3. Propriétés d’hydratation

La transformation des particules élémentaires d’une semoule ou d’une farine en grains de couscous se résume en une agglomération nécessitant la présence d’un liquide d’hydratation.

C'est pour cette raison que la compréhension de la mise en forme des grains de couscous nécessite une bonne connaissance des propriétés d'hydratation de la poudre céréalière avant sa mise en œuvre. Dans cette section, nous allons essayer de décrire les propriétés d'hydratation de la semoule et farines étudiées (semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre) à travers la capacité de gonflement dans l'eau et les isothermes de sorption.

Les résultats concernant la capacité de gonflement dans l'eau de la semoule et farines étudiées sont représentés dans la figure 26. Il s'avère nettement que les différents échantillons absorbent des volumes en eau différents et présentent des indices de gonflement significativement différents ($p < 0,05$). Nous pouvons remarquer que la farine de l'orge présente l'indice de gonflement le plus élevé avec une valeur de 118,04 ml/100 g sans qu'il n'y ait une différence significative ($p > 0,05$) avec celle enregistrée avec la semoule de blé dur (93,37 ml/100 g). Par ailleurs, la farine de blé tendre se présente avec un indice de gonflement le plus faible (21,67 ml/100 g) avec une différence significative ($p < 0,05$) par rapport à la semoule de blé dur et à la farine d'orge.

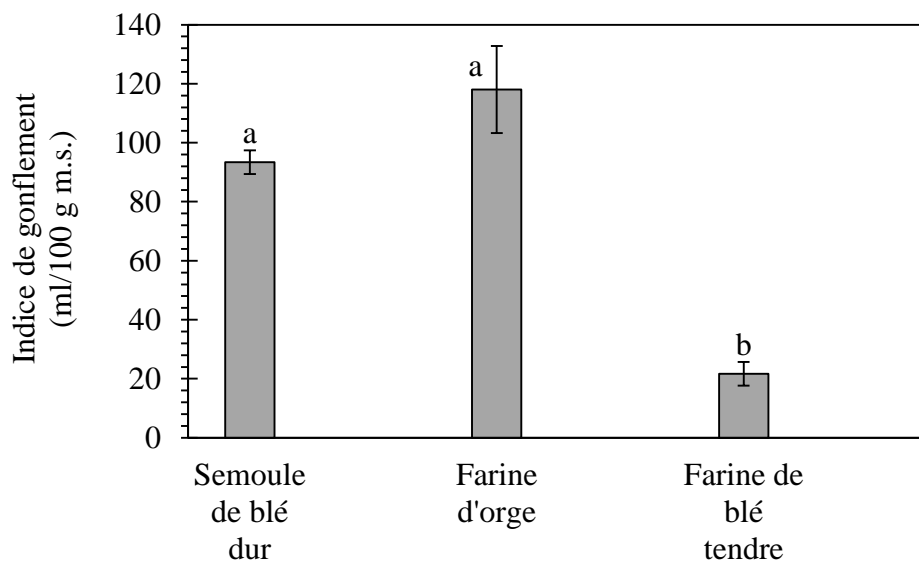


Figure 26. Indice de gonflement dans l'eau de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre

La figure 27 représente les isothermes de sorption traduits par le changement en masse en fonction de l'humidité relative à une température de 25 °C. En se basant sur la classification de l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) (Sing *et al.*, 1985 ; Rouquerol et Rouquerol, 2014), nous pouvons conclure que la semoule de blé dur, la farine d'orge et la farine de blé tendre présentent des isothermes de sorption de type II. Selon Rondet (2008) et Delcour et

Hoseney (2010), cette classe d'isotherme est caractérisée par la formation de couches multiples de molécules d'eau absorbées par un solide non poreux. Il a été rapporté par Bushuk et Winkler (1957) que le blé et ces produits dérivés (semoule/farine, amidon et gluten) ont des isothermes de sorption en forme de « S » et présentent des hystérésis. Le même type d'isothermes a été décrit dans des travaux précédents portant sur les propriétés de sorption des semoules et farines de blé (Lagoudaki *et al.*, 1993; Hébrard *et al.*, 2003; Erbaş *et al.*, 2005; Ocieczek, 2007).

Selon les résultats représentés dans la figure 27, il apparaît que les allures des trois courbes sont similaires et les poudres céréalières se comportent de la même manière. Néanmoins, nous pouvons constater que la farine de blé tendre absorbe une masse d'eau plus importante que celle absorbée par la farine d'orge et beaucoup plus que celle absorbée par la semoule de blé dur.

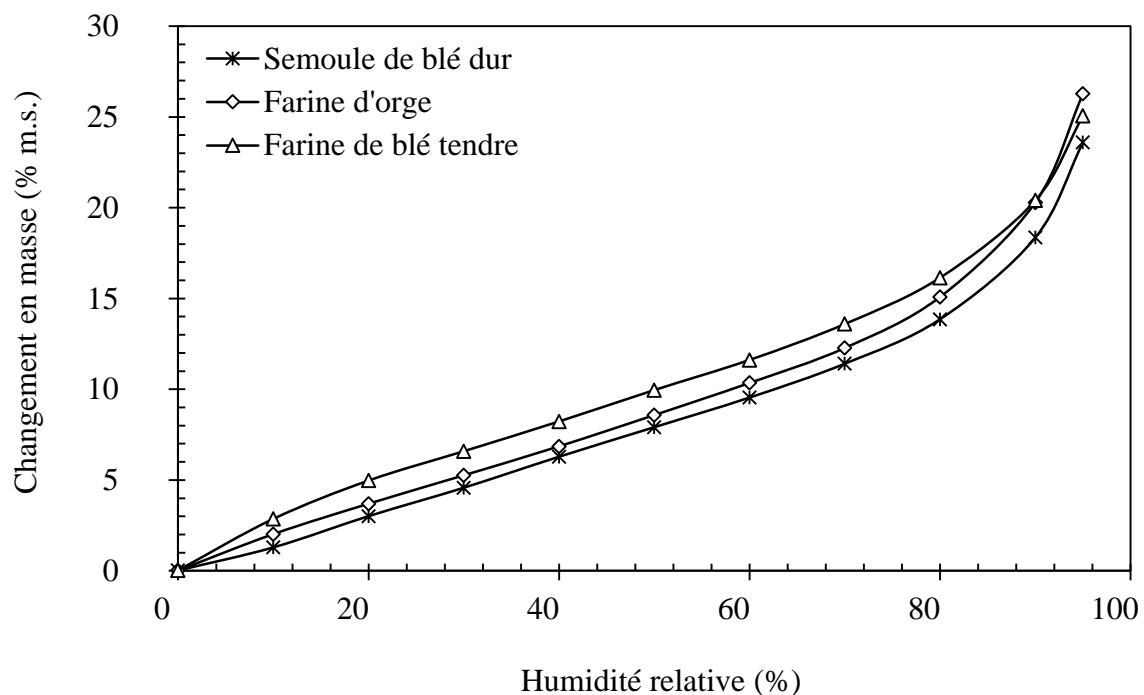


Figure 27. Isothermes de sorption de la semoule de blé dur, de la farine d'orge et de la farine de blé tendre à 25 °C

En plus des différences constatées des gains en masse entre les trois poudres céréalières, ces dernières mettent des temps significativement différents ($p < 0,05$) pour atteindre l'équilibre à une humidité relative de 95 % (Figure 28). Nous constatons que la farine de blé tendre absorbe la vapeur d'eau d'une façon plus rapide que la semoule de blé dur et la farine d'orge. Ceci peut être due aux teneurs élevées en protéines dans la FBT (Erbaş *et al.*, 2005; Ocieczek, 2007), à la finesse des particules natives de la FBT (Hébrard *et al.*, 2003) et à la dureté des particules de la

SBD semoule qui gêne le processus de diffusion de l'eau, limitant ainsi le volume de sorption (Roman-Gutierrez *et al.*, 2003).

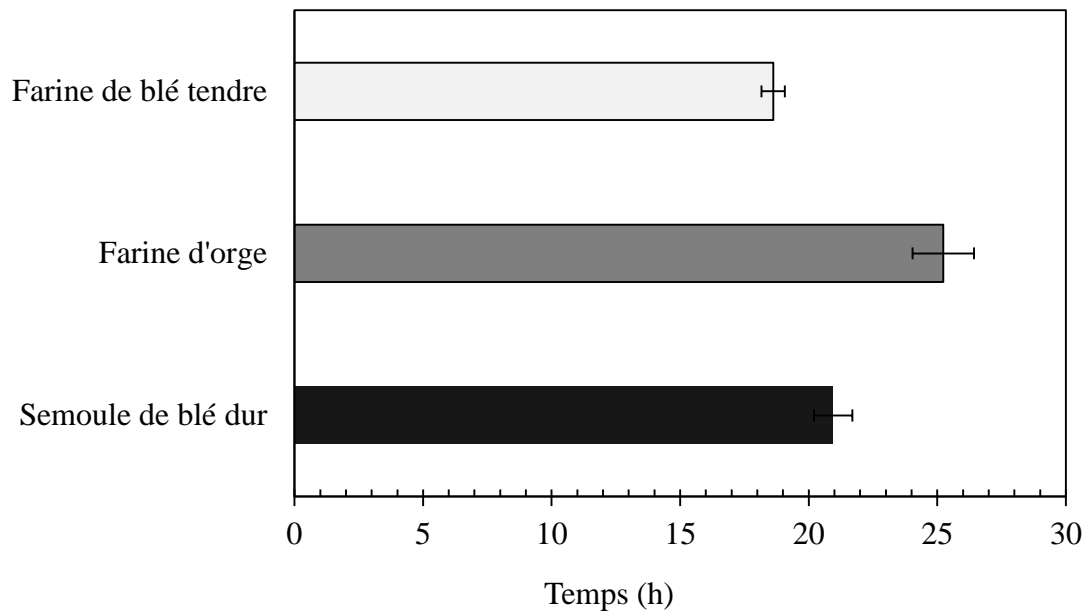


Figure 28. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre à une humidité relative de 95 % pendant l'absorption de la vapeur d'eau par la semoule de blé dur, la farine d'orge et la farine de blé tendre

2. Effet de l'incorporation de la farine de blé tendre

2.1. Propriétés rhéologiques d'agglomération

Pour comprendre l'objectif de l'utilisation de la farine de blé tendre dans l'étape de finition pendant le procédé de fabrication du couscous artisanal, nous avons procédé à l'étude des propriétés rhéologiques pendant l'agglomération humide des mélanges SBD/FBT et FO/FBT à l'aide d'un rhéomètre MTR-Caleva[®]. Les taux d'ajout considérés sont 0 (témoin), 5 %, 10 %, 15 %, 20 et 100 %, et les résultats obtenus sont montrés dans la figure 29. Durant la granulation humide dans le MTR-Caleva[®], différentes structures d'agglomérats de différentes tailles ont été mises en forme et observées dans le mélange.

L'observation de la figure 29-I montre que le couple de torsion demeure constant lorsque la proportion de la farine de blé tendre augmente de 0 à 20 % jusqu'au ratio d'hydratation de 0,4 ml/g. Au-delà de cette valeur, le couple de torsion augmente avec la proportion de la farine de blé tendre ajoutée jusqu'au ratio de 0,6 ml/g selon les mélanges. Pour des ratios supérieurs à 0,6 ml/g, le couple de torsion chute progressivement.

Pour la farine d'orge (figure 29-II), l'allure générale des courbes est relativement semblable à celle des mélanges de la semoule de blé dur et de la farine de blé tendre. Mais concernant la mesure du couple de torsion, les valeurs obtenues dans le cas des mélanges de la farine d'orge et de la farine de blé tendre, sont trois fois plus faibles que celles observées pour la semoule de blé dur additionnée par de la farine de blé tendre. En plus, nous pouvons constater que les valeurs les plus élevées des couples de torsion sont obtenues à des ratios d'hydratation plus élevés pour la farine d'orge que pour la semoule de blé dur.

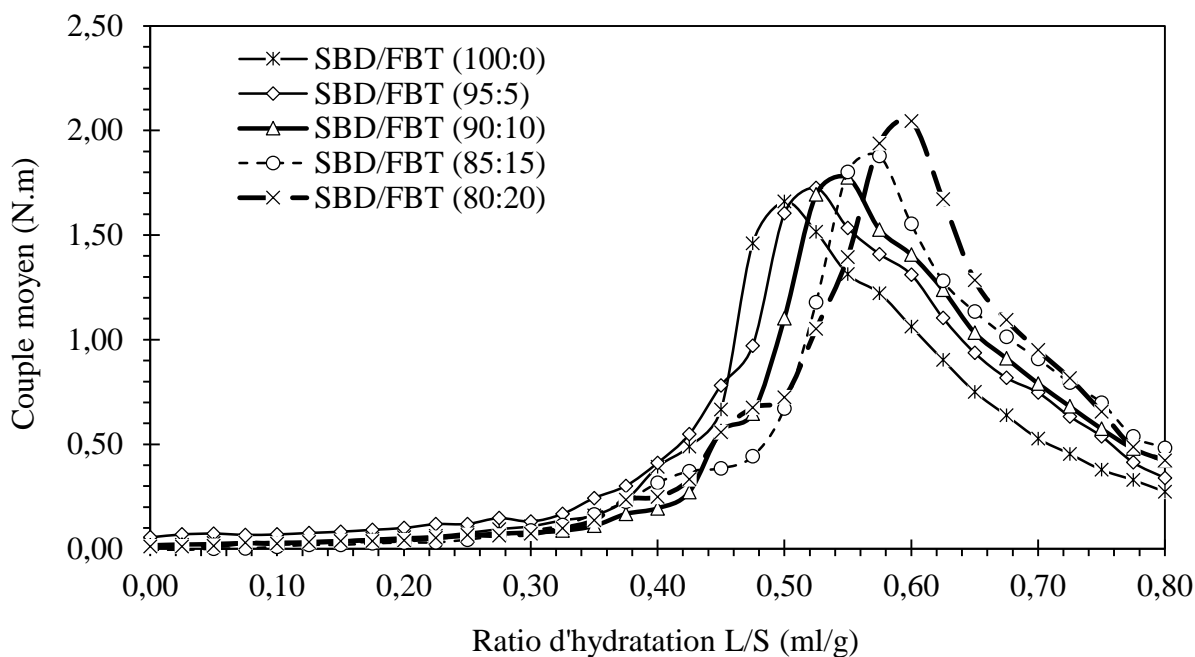
Nous pouvons remarquer que le couple de torsion maximal enregistré par le MTR-Caleva[®] augmente avec l'augmentation du taux d'ajout de la FBT que ce soit avec la SBD ou avec la FO. Selon [Murrieta-Pazos et al. \(2014\)](#), lorsque la taille des particules natives est réduite (tel est le cas de la farine de blé tendre), l'ensemble des forces de liaisons entre les particules semble être favorisé. Pendant l'agglomération humide, le liant diffuse facilement dans les fines particules et provoque l'évolution des matrices protéiques donnant lieux à des ponts visqueux. L'ajout de la FBT peut être considéré comme un apport en protéines dans le mélange en particulier le gluten, qui selon [Delcour et Hosney \(2010\)](#) peut se complexer avec l'amidon après leur hydratation en développant des forces de cohésion plus forte entre les particules. Dans d'autres travaux ([Galiba et al., 1988](#); [Mohamad Saad et al., 2009](#)), les forces de cohésion entre les particules pendant l'agglomération ont été liées à l'état des grains d'amidon (natif/endommagé). Les poudres

céréalières finement moulues renferment des taux très élevés en amidon endommagé, ce dernier interagit avec le liquide d'hydratation, gonfle et favorise les forces de cohésion entre particules (Hellman *et al.*, 1952 ; El-Khawas *et al.*, 1966).

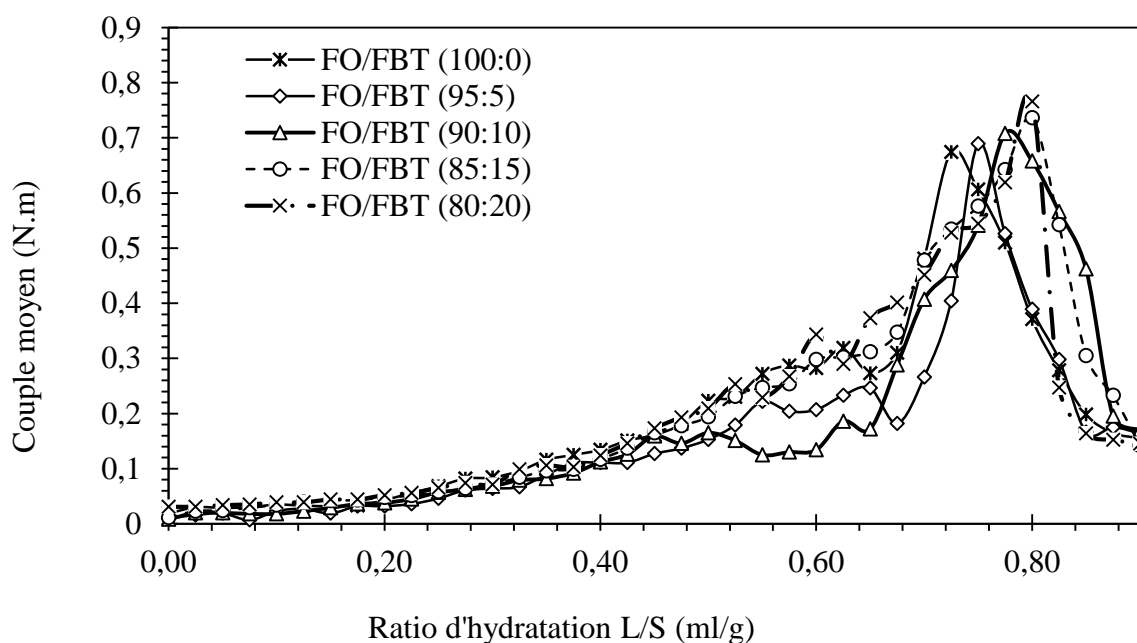
En outre, il paraît clairement que plus le taux d'ajout de la FBT augmente, plus le développement des forces de cohésion entre les particules nécessite un apport plus important en eau d'hydratation. Pendant l'agglomération humide de la SBD (SBD/FBT 100:0), le MTR-Caleva® a enregistré un couple de torsion maximal de 1,66 N.m pour un ratio d'hydratation de 0,50 ml/g. Ce ratio d'hydratation (L/S) a augmenté au fur et mesure que le taux d'ajout de la FBT augmente pour atteindre 0,60 ml/g et développe un couple de torsion maximal de 2,05 N.m avec un taux de substitution de 20 % (SBD/FBT 80:20). Le même constat peut être fait sur le comportement rhéologique pendant l'agglomération humide dans le MTR-Caleva® de la farine d'orge additionnée de la farine de blé tendre, où le couple maximal a augmenté de 0,674 à 0,766 N.m en augmentant le taux d'ajout de la FBT de 0 à 20 %, et le ratio d'hydratation (L/S) a également connu une augmentation de 0,73 à 0,80 ml/g. La surface spécifique étant inversement proportionnelle à la taille des particules (Murrieta-Pazos *et al.*, 2014), on constate une plus grande absorption d'eau dans les petites particules, qui ont un volume spécifique plus petit. Par conséquent, le même volume d'eau mouille la particule plus en profondeur, donc la formation de ponts entre les particules peut être observée. Par contre, les grosses particules absorbent un faible volume d'eau, ce qui rend la formation de ponts conduisant à l'obtention de granulés plus difficile.

L'intensité du couple de torsion est inversement proportionnelle à l'inertie qu'oppose le matériau à la rotation du bras du rhéomètre. Il semble évident que plus les particules du lit de poudre se lient les unes aux autres, plus le matériau oppose plus d'inertie à la rotation du bras du rhéomètre.

A partir de ce résultat, il est à conclure que l'addition de la FBT fait augmenter la demande en volume d'eau nécessaire à la mise en forme des agglomérats de couscous et favorise le mécanisme de la granulation que ce soit de la semoule de blé dur ou de la farine d'orge.



(I)



(II)

Figure 29. Evolution du couple moyen de torsion en fonction du ratio de mouillage (L/S) pendant l'agglomération humide des mélanges de la farine de blé tendre (I) avec la semoule de blé dur (SBD/FTB) et (II) avec la farine d'orge (FO/FTB)

2.2. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus à l'échelle laboratoire

Les agglomérats humides obtenus avec le granulateur Mi-Pro® ont été caractérisés et les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 10. Les résultats montrent que la teneur en eau des agglomérats humides augmente significativement ($p < 0,05$) avec l'augmentation de la proportion de la FBT ajoutée aussi bien dans le cas de la SBD que dans celui de la FO. Elle passe de 33,30 % pour le témoin (SBD-FBT 100-0) à 37,68 % pour un taux d'ajout de 20 % (SBD-FBT 80-20) et de 43,50 % dans le cas de la FO (FO-FBT 100-0) à 47,20 % pour un taux d'ajout de 20 % (FO-FBT 80-20). La finesse des particules de la FBT ($d_{50} = 70,90 \mu\text{m}$) et les propriétés de réactivité avec l'eau d'hydratation peuvent être responsables de l'augmentation de la teneur en eau des agglomérats humides. Les teneurs en eau des agglomérats de FO-FBT se situent à un niveau supérieur comparé aux teneurs en eau des agglomérats de SBD-FBT. L'augmentation de l'humidité des agglomérats lorsque la proportion de FBT augmente dans le mélange peut s'expliquer par l'élévation du taux d'amidon endommagé constituant la FBT. La différence des teneurs en eau des agglomérats de SBD-FBT et FO-FBT peut s'expliquer par la différence de composition biochimique entre la SBD et la FO. En effet, la FO est beaucoup plus riche en fibres que la SBD. Les fibres sont évidemment reconnues pour une grande capacité d'absorption d'eau (Aymard, 2010). Hébrard *et al.*, (2003) ont rapporté que les fines particules ont une surface spécifique plus élevée par unité de volume que les grosses particules et par conséquent un espace d'échange avec l'eau d'hydratation plus important. Le temps nécessaire pour que les molécules d'eau diffusent de la surface au centre de la particule est plus court pour les fines particules que pour les grosses particules.

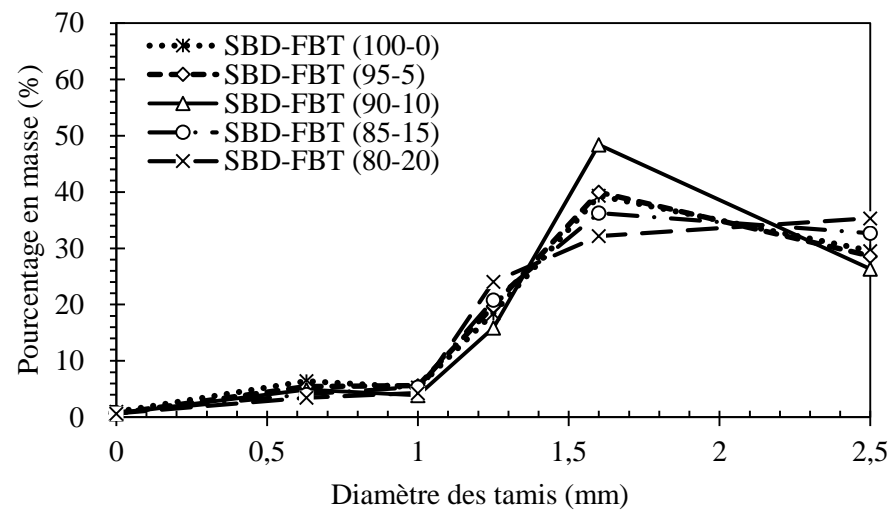
Par ailleurs, nous remarquons que le rendement au roulage a connu une baisse significative après l'ajout de la FBT à la SBD et ceci en faveur de la fraction pâteuse qui a augmenté significativement avec l'augmentation du taux d'ajout de la FBT ($p < 0,05$). La baisse du rendement au roulage qui se traduit par une augmentation de la fraction pâteuse laisse penser que la FBT additionnée présente une grande aptitude au colmatage en raison probablement d'une hétérogénéité de répartition de l'eau d'hydratation. La baisse du rendement au roulage n'est pas très apparente dans le cas de la FO-FBT même si la fraction pâteuse a tendance d'augmenter.

Le d_{50} des agglomérats humides obtenus semble être significativement affecté ($p < 0,05$) par l'ajout de la FBT à la SBD et à la FO. Nous constatons que le d_{50} augmente avec l'augmentation du taux de l'ajout de la FBT. Dans le cas où la FBT est ajoutée à la SBD, le d_{50} passe de 1804,58 à 1932,67 μm pour des taux d'ajout de la FBT de 0 % et 20 % respectivement. Le même constat

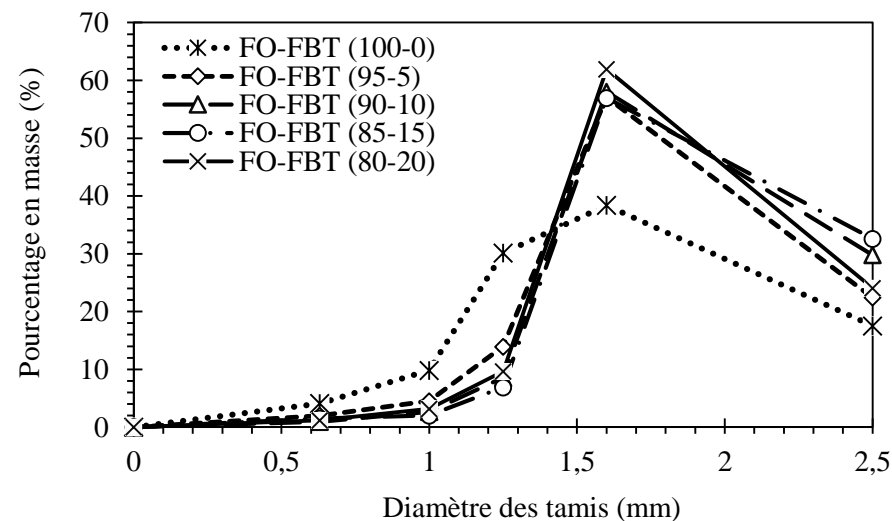
peut être noté lorsque la FBT est ajoutée à la FO, où le d_{50} passe de 1680,33 à 2007,56 μm pour des taux d'ajout allant de 0 à 20 %.

Le d_{50} augmente avec l'augmentation de la proportion de la FBT ajoutée. L'aptitude de la FBT hydratée à adhérer à la surface des grains de SBD eux-mêmes humectés d'eau s'accroît avec l'augmentation de la quantité de FBT ajoutée d'une part et, d'autre part cette FBT hydratée obture les vides interparticulaires (particules de SBD) donnant ainsi des agglomérats de d_{50} plus grands. Pour la SBD (le témoin), le d_{50} des agglomérats humides est supérieur au d_{50} des agglomérats humides de FO qui pourtant a un d_{50} de 491 μm . Cependant, dès que la FBT est ajoutée à la SBD ou à la FO, le d_{50} des agglomérats obtenus avec la FO dépasse le d_{50} de ceux obtenus avec de la SBD. Ces observations laissent penser que l'agglomérat de FO-FBT se forme plus vite que celui de SBD-FBT. Il a été rapporté par [Barkouti et al. \(2014\)](#) qu'en présence de fines particules (apportées par l'ajout de la FBT dans le cas de la présente étude), l'eau d'hydratation est facilement fixée dans les capillaires inter-particulaires et aide à la formation des ménisques entre les nucléi en induisant leur coalescence et la formation d'agglomérats plus volumineux.

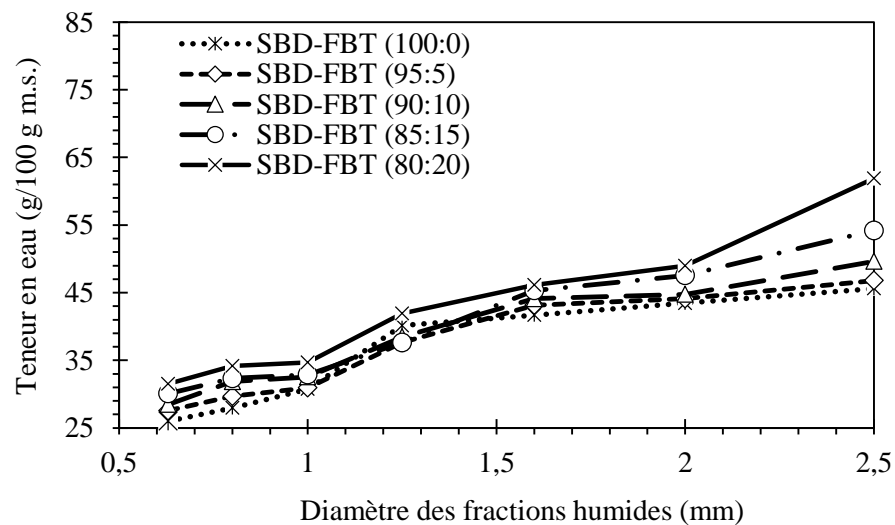
Pour la distribution granulométrique représentée sur la figure 30-a.b, nous pouvons constater que l'addition de la FBT à la SBD entraîne la formation des agglomérats ayant une taille de 1600 μm au détriment de ceux ayant une taille de 2500 μm , ceci reste notable pour un taux d'ajout de 10 % (SBD-FBT 90-10). Pour un taux d'ajout de 15 % les masses d'agglomérats de taille 1600 et 2500 μm sont sensiblement identiques. Pour des taux d'ajout plus importants (20 %), nous pouvons noter que les masses agglomérées obtenues contiennent beaucoup plus de gros agglomérats ayant une taille de 2500 μm que ceux ayant une taille de 1600 μm . A partir de ces résultats, nous pouvons déduire que les particules de la farine de blé tendre participent au phénomène de boule de neige qui mène à la croissance des agglomérats ainsi formés. Dans le cas de la farine d'orge (Figure 30-b), les proportions d'agglomérats de taille 1200, 1600 et 2500 μm sont sensiblement équivalentes. Après addition de la FBT, la proportion d'agglomérats de taille de 1600 μm devient prépondérante suivie de celle de 2500 μm . Cette distribution granulométrique ne semble pas dépendre de la quantité de la FBT ajoutée. Ceci laisse suggérer que l'ajout de la FBT favorise la formation d'agglomérats de taille 1600 μm . Il est à noter que l'ajout de la farine de blé tendre (tous taux d'ajout confondus) entraîne la formation simultanée de gros agglomérats ayant une taille variant de 1600 à 2500 μm et cela en défaveur des agglomérats de 1250 μm de taille. Il peut être également noté que l'ajout de la FBT à la FO permet l'obtention d'une population d'agglomérats plus homogène caractérisée par une distribution bimodale alors qu'elle était trimodale sans ajout de la FBT.



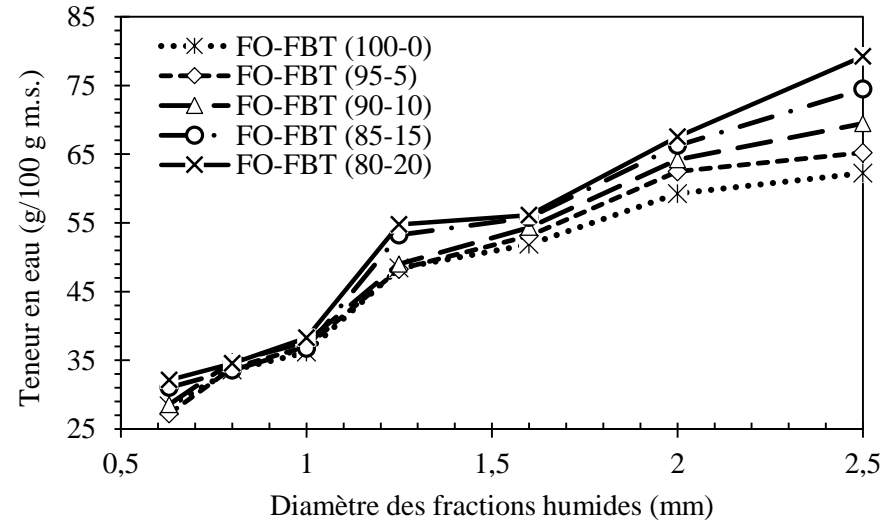
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 30. Distributions granulométriques (a) SBD-FBT, (b) FO-FBT et teneur en eau des fractions humides (c) SBD-FBT, (d) FO-FBT des agglomérats obtenus par le granulateur Mi-Pro®

Les différentes fractions granulométriques des agglomérats humides ont été séparées et leurs teneurs en eau ont été déterminées. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 30-c.d. Concernant l'humidité des différentes fractions des agglomérats humides, il apparaît que la teneur en eau des agglomérats augmente avec leur taille aussi bien pour la SBD que pour la FO. Lorsque la FBT est additionnée à la SBD et à la FO, la différence de la teneur en eau des agglomérats à différents taux d'ajout de la FBT, n'est pas bien visible. Par contre, la différence devient de plus en plus marquée lorsque la taille des agglomérats s'élève aux environs de 2500 μm . Les teneurs en eau des agglomérats de FO-FBT dépassent celles des agglomérats de SBD-FBT en raison de leur teneur élevée en fibres. En passant d'un taux d'ajout de 0 à 20 % de la farine de blé tendre, la teneur en eau des agglomérats humides ayant un diamètre de 2500 μm passe de 45,61 à 61,88 g/100 g m.s. dans la semoule de blé dur et de 62,23 à 79,42 g/100 g m.s. dans la farine d'orge. L'augmentation de la taille des agglomérats et de leur teneur en eau suite à l'ajout de la farine de blé tendre pourront probablement influencer la conduite de précuisson et de séchage lors de la fabrication des grains de couscous.

Indépendamment de la teneur en eau, les agglomérats de SBD présentent des densités aérées et tassées supérieures à celles des agglomérats de FO. Lorsque des proportions croissantes de FBT sont additionnées à la SBD, les densités aussi bien aérées que tassées augmentent. Pour le cas de la FO, la densité aérée semble augmenter avec l'augmentation des proportions de la FBT ajoutée contrairement à la densité tassée qui demeure constante. Cette augmentation résulte probablement du fait que la FBT hydratée tapisse les espaces interparticulaires d'une part et remplit les endroits concaves se trouvant sur le relief de l'agglomérat lui conférant un aspect lisse. La densité tassée dans le cas de FO-FBT reste constante quel que soit le taux d'ajout de la FBT, probablement du fait que les agglomérats de FO-FBT sont plus gros et ne changent pas de volume après tassement.

Par ailleurs, l'obtention des agglomérats humides plus denses après l'ajout de la FBT peut être lié à la présence des fines particules de la FBT, qui d'une part s'imbriquent facilement dans la structure des agglomérats ainsi formés et occupent la porosité intra-granulaire (Barkouti *et al.*, 2014), et d'une autre part, favorisent le développement des forces de cohésion interparticulaires grâce aux propriétés de réactivité avec l'eau d'hydratation (Rondet *et al.*, 2013 ; Bellocq *et al.*, 2018a). Par ailleurs, il a été rapporté par Galiba *et al.* (1988) que l'indice d'absorption d'eau augmente avec les farines ayant de fines particules permettant une gélatinisation plus importante de l'amidon. Le gel ainsi formé pourrait vraisemblablement occuper la porosité interne des agglomérats formés et réduire l'espace intra-granulaire.

Tableau 10. Paramètres caractérisant les agglomérats humides obtenus après l'ajout de la FBT à la SBD et à la FO

Effet de l'ajout de la FBT à la SBD					
Caractéristiques	SBD/FBT (100:0)	SBD/FBT (95:5)	SBD/FBT (90:10)	SBD/FBT (85:15)	SBD/FBT (80:20)
Teneur en eau (g/100g m.s.)	33,30 (± 0,46) ^b	33,79 (± 1,40) ^b	35,09 (± 1,03) ^{ab}	35,65 (± 1,10) ^{ab}	37,68 (± 1,38) ^a
Rendement d'agglomération (%)	93,77 (± 1,48) ^a	91,09 (± 1,18) ^{ab}	89,11 (± 1,01) ^{bc}	90,77 (± 1,84) ^{abc}	87,06 (± 1,74) ^c
d ₅₀ (µm)	1804,58 (± 24,95) ^b	1842,28 (± 50,28) ^{ab}	1857,61 (± 13,72) ^{ab}	1873,98 (± 33,74) ^{ab}	1932,67 (± 45,55) ^a
Fraction pâteuse (%)	6,15 (± 0,34) ^c	8,24 (± 0,74) ^b	9,04 (± 0,86) ^b	9,42 (± 0,76) ^b	12,57 (± 0,99) ^a
Densité aérée (g/cm ³)	0,563 (± 0,00) ^c	0,575 (± 0,01) ^c	0,581 (± 0,00) ^{bc}	0,606 (± 0,00) ^{ab}	0,623 (± 0,02) ^a
Densité tassée (g/cm ³)	0,635 (± 0,01) ^b	0,644 (± 0,01) ^{ab}	0,653 (± 0,00) ^{ab}	0,658 (± 0,01) ^{ab}	0,689 (± 0,04) ^a
Effet de l'ajout de la FBT à la FO					
Caractéristiques	FO/FBT (100:0)	FO/FBT (95:5)	FO/FBT (90:10)	FO/FBT (85:15)	FO/FBT (80:20)
Teneur en eau (g/100g m.s.)	43,55 (± 1,30) ^b	44,11 (± 0,25) ^b	45,10 (± 0,81) ^{ab}	45,33 (± 0,68) ^{ab}	47,20 (± 0,86) ^a
Rendement d'agglomération (%)	90,18 (± 2,09) ^a	94,31 (± 1,95) ^a	92,51 (± 2,57) ^a	92,26 (± 2,96) ^a	90,88 (± 3,15) ^a
d ₅₀ (µm)	1680,33 (± 40,12) ^b	1860,99 (± 84,04) ^{ab}	1941,28 (± 76,37) ^a	1990,82 (± 99,06) ^a	2007,56 (± 74,41) ^a
Fraction pâteuse (%)	4,82 (± 2,09) ^a	5,69 (± 1,95) ^a	7,49 (± 2,57) ^a	7,74 (± 2,96) ^a	9,12 (± 3,15) ^a
Densité aérée (g/cm ³)	0,513 (± 0,01) ^c	0,575 (± 0,00) ^b	0,577 (± 0,00) ^b	0,596 (± 0,02) ^{ab}	0,603 (± 0,00) ^a
Densité tassée (g/cm ³)	0,593 (± 0,03) ^b	0,629 (± 0,00) ^a	0,635 (± 0,01) ^a	0,653 (± 0,02) ^a	0,652 (± 0,01) ^a

Les valeurs en ligne ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes (p > 0,05).

2.3. Variabilité des agglomérats humides suite à l'ajout de FBT

L'analyse en composantes principales (ACP) de la variabilité des agglomérats obtenus à différents taux d'ajout de FBT selon un ensemble de caractères est représentée dans la figure 31. Il paraît clairement que l'ACP permet l'explication de 88,78 % de la variabilité entre les agglomérats humides. Le cercle de corrélations représenté dans la figure 31-A correspond à la projection des variables sur un plan à deux dimensions constitué par les deux premiers facteurs F1 (53,59 %) et F2 (35,19 %). Le facteur F1 est positivement corrélé avec le couple de torsion, la taille des agglomérats, la fraction pâteuse et les densités aérée et tassée. De l'autre côté, le facteur F2 est positivement corrélé avec le taux d'hydratation optimal, la teneur en eau et la taille des agglomérats humides (Annexe5). Le cercle des corrélations permet de visualiser les caractéristiques des agglomérats humides qui sont influencées par l'ajout de la FBT à la SBD et à la FO. Il se voit clairement que le taux d'ajout de la FBT présente des corrélations hautement significativement avec la taille des agglomérats ($P < 0,0001$; $r = 0,83$), la fraction pâteuse ($P < 0,0001$; $r = 0,86$) et les densités aérée ($P < 0,0001$; $r = 0,87$) et tassée ($P < 0,0001$; $r = 0,80$). Par ailleurs, une corrélation négative a été notée entre le taux d'ajout de la FBT et le rendement d'agglomération humide ($P < 0,0001$; $r = - 0,51$) (Annexe 6).

Le biplot obtenu par la superposition du plan des individus avec celui des variables est représenté dans la figure 31-B. Cette représentation permet la classification des individus (agglomérats humides fabriqués avec différents taux d'ajout de la FBT) en groupes distincts en les associant à leurs différentes caractéristiques et il paraît qu'il existe cinq groupes différents. Le premier groupe rassemble les agglomérats fabriqués avec de la SBD additionnée de FBT à des taux de 15 et 20 % qui sont associés à un diamètre médian, une fraction pâteuse, une densité et un couple de torsion très importants. Le deuxième groupe représente les agglomérats humides fabriqués avec de la FO additionnée de FBT à des taux de 15 et 20 %. Ce groupe est associé à des taux d'hydratation optimale les plus élevés et une humidité très importante d'une part. D'une autre part, ce groupe peut être caractérisé par la grosseur des agglomérats, l'abondance de la fraction pâteuse et une structure plus dense. Le troisième groupe rassemble les agglomérats fabriqués à base de la FO additionnée de FBT à des taux de 5 et 10 %. Les variables associées à ce groupe est le taux d'hydratation élevé et une teneur en eau importante avec un rendement d'agglomération très intéressant. Le quatrième groupe concerne les agglomérats humides à base de la SBD additionnée de FBT à des taux de 5 et 10 %. Il semble qu'à ces taux d'ajout de FBT, les agglomérats sont associés seulement au couple de torsion. Enfin, le cinquième groupe représente les deux échantillons témoins de SBD et de la FO sans addition de la FBT. Ces derniers sont associés à des valeurs de variables les plus faibles telles que le ratio d'hydratation, le couple de torsion, le d_{50} , la fraction pâteuse et la densité.

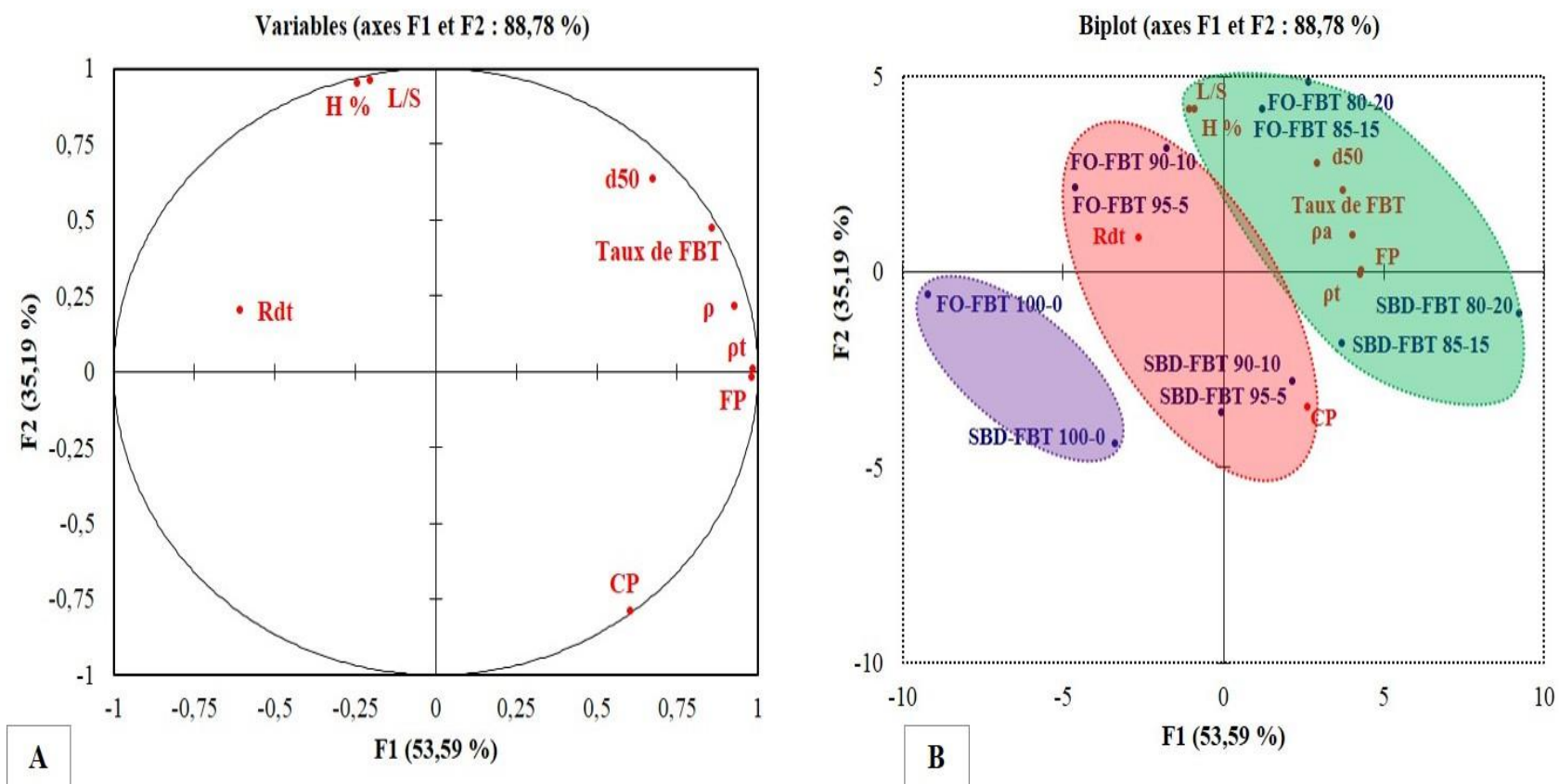


Figure 31. Analyse en composantes principales de la variabilité des agglomérats humides obtenus par agglomération humide de la SBD et de la FO additionnées de la FBT dans le granulateur Mi-Pro® en fonction de leurs caractéristiques, (A) projection des variables sur le cercle des corrélations et (B) représentation des individus et de leurs caractéristiques. Abréviations (L/S : ratio d'hydratation, Rdt : rendement d'agglomération, H % : teneur en eau, d₅₀ : diamètre médian, ρa : densité aérée, ρt : densité tassée, FP : fraction pâteuse, CP : couple de torsion)

3. Effet de l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation

A travers l'enquête réalisée dans la région Nord-Est de l'Algérie sur la fabrication du couscous artisanal, il a été constaté que l'hydratation de la semoule de blé dur pendant le roulage se fait avec de l'eau salée par la majorité des enquêtées (87 %). Il apparaît que la salinité de l'eau d'hydratation pourrait influencer la qualité du couscous. Le choix de l'addition du sel est en général justifié par l'amélioration de la saveur du produit et une meilleure protection contre les altérations lors du stockage.

3.1. Propriétés rhéologiques d'agglomération

La présence du sel dans l'eau d'hydratation pourra modifier le phénomène d'agglomération des particules de la semoule en grains de couscous. Dans cette optique, l'effet de la salinité de l'eau d'hydratation sur les propriétés rhéologiques a été étudié pendant l'agglomération humide de la semoule de blé dur et de la farine d'orge dans le rhéomètre MTR-Caleva® par suivi du couple de torsion. Les différentes concentrations en sel de table (NaCl) utilisées sont 1,6 ; 3,2 ; 6,4 ; 12,8 % et une eau saturée en sel de table. Les résultats de l'évolution du couple de torsion pendant l'agglomération de la semoule de blé dur et de la farine d'orge sont représentés dans la figure 32.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation affecte les comportements rhéologiques pendant l'agglomération des deux poudres céréalières. Nous pouvons noter que le couple de torsion développé diminue avec l'augmentation de la concentration du sel dans l'eau d'hydratation. Au fur et à mesure que le liquide d'hydratation est injecté, les forces de cohésion développées par les mélanges augmentent. Le couple de torsion maximal enregistré se voit diminuer avec l'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'hydratation.

Pour la semoule de blé dur hydratée avec de l'eau douce (sans sel), le couple de torsion maximal est de 1,66 N.m. Ensuite, une baisse a été notée en hydratant avec une eau contenant 1,6 % de sel donnant un couple de torsion maximal de 1,56 N.m. Après l'amplification de l'éventuel effet du sel par l'augmentation des concentrations, la baisse des couples de torsion se montre plus nette et les forces de cohésion sont plus faibles. La concentration en sel de 12,8 % permet d'enregistrer un couple de torsion de 1,21 N.m. Par ailleurs et avec une eau saturée en sel, le couple de torsion maximal enregistré par le MTR-Caleva® est de 0,86 N.m.

Pendant l'agglomération humide de la farine d'orge dans le rhéomètre MTR-Caleva®, la salinité du liquide d'hydratation a influencé le comportement rhéologique de la même façon qu'avec la

semoule de blé dur. Nous pouvons constater que les forces de cohésion développées avec la farine d'orge sont moindres comparativement à la semoule de blé dur. Le premier échantillon hydraté avec de l'eau douce se voit avec un couple de torsion de 0,67 N.m. Cette valeur a enregistré une baisse avec l'augmentation de la concentration en sel ; le MTR-Caleva® a enregistré un couple de 0,59 ; 0,51 ; 0,48 ; 0,44 et 0,37 N.m pour des concentrations en sel de 1,6 ; 3,2 ; 6,4 ; 12,8 % et l'eau saturée en sel respectivement.

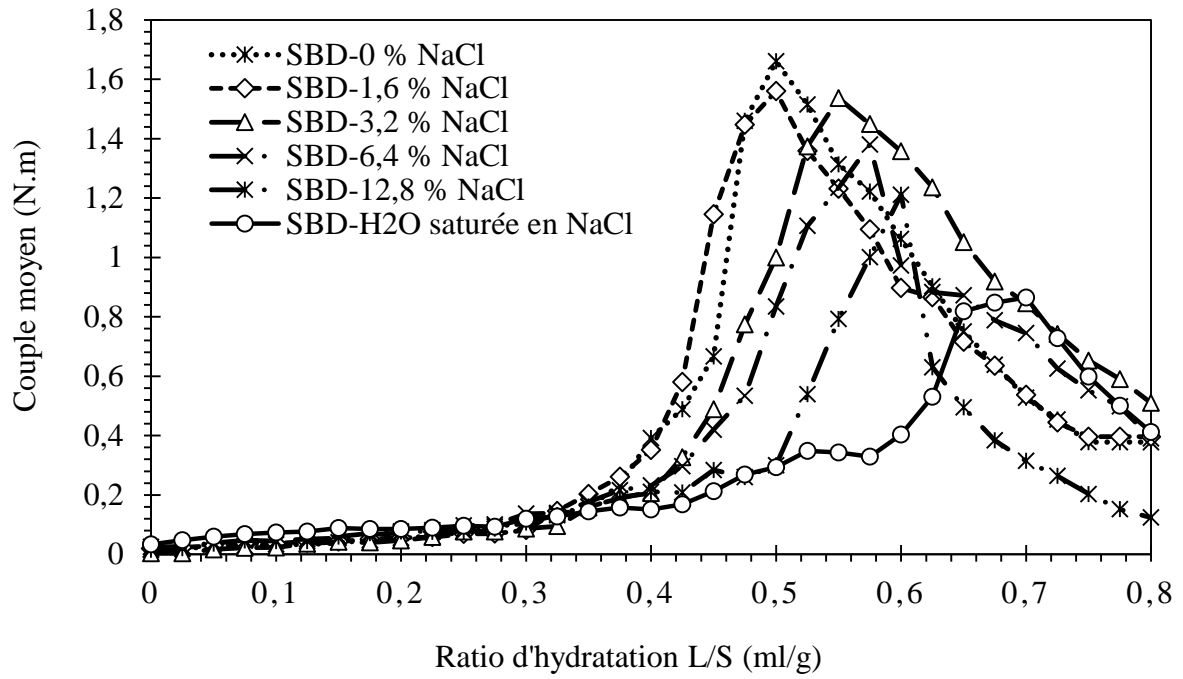
Pour les ratios d'hydratation enregistrés avec chaque essai, il ressort que l'augmentation de la concentration en sel entraîne l'augmentation du volume du liquide nécessaire à la granulation de la poudre céréalière en grains de couscous. Nous remarquons le couple maximal est atteint avec un taux d'hydratation de 0,55 ml/g et ceci avec une eau contenant 3,2 % de sel, alors que dans le cas de la semoule de blé dur, nous remarquons qu'avec une concentration en sel de 3,2 %, le ratio d'hydratation optimal est de 0,55 ml/g alors qu'il était de 0,50 ml/g avec une eau douce. Ce ratio continue à augmenter avec l'augmentation de la concentration en sel pour atteindre 0,70 ml/g avec une eau totalement saturée avec du sel. Le même constat peut être fait avec la farine d'orge ; pour une eau douce, le couple maximal est enregistré à un ratio d'hydratation de 0,72 ml/g. Les résultats montrent que ce ratio affiche des valeurs de 0,75 ; 0,78 ; 0,80 ; 0,83 ml/g pour des concentrations en sel respectives de 1,6 ; 3,2 ; 6,4 % et une eau saturée en sel.

L'augmentation du ratio d'hydratation observée suite à l'augmentation des concentrations en sel peut être expliquée par la modification des propriétés physiques du liquide d'hydratation. La salinité de l'eau d'hydratation semble agir sur ses propriétés de mouillabilité, ceci rend les poudres céréalières étudiées plus exigeantes en termes de volume de l'eau optimal nécessaire à leur granulation. Il a été rapporté dans la littérature que l'addition du sel entraîne une augmentation de l'angle de contact (Nasralla *et al.*, 2011 ; Al-Yaseri *et al.*, 2016). Par ailleurs, il a été démontré dans les travaux d'Aulton *et al.* (1977) que la tension superficielle et la mouillabilité sont inversement proportionnelles à l'angle de contact.

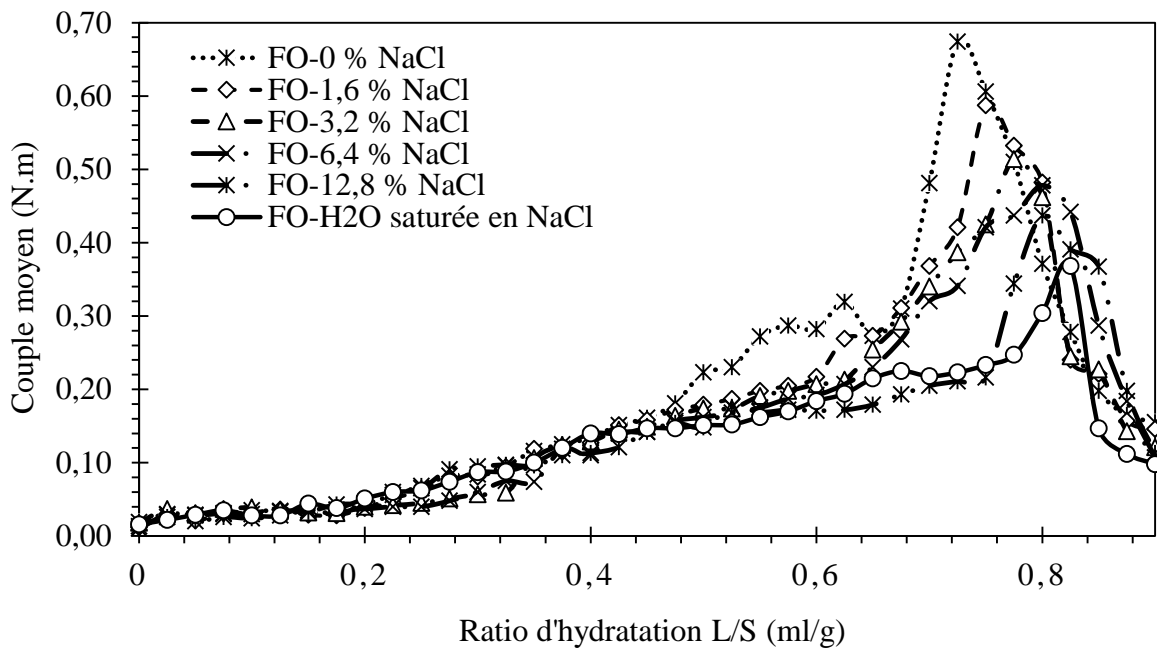
Suite à la baisse de la mouillabilité entraînée par l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation, les particules natives de la semoule de blé dur et de la farine d'orge restent insuffisamment hydratées. Par conséquent, la solubilisation des composés de semoule et de farine reste limitée et la formation des ponts liquides mobiles et non mobiles est influencée (Pietsch, 1997). Dans de telles conditions de salinité, les forces de cohésion qui se développent pendant l'agglomération humides sont de nature faible, ce qui se traduit par des couples de torsion

faibles. Il apparaît donc que l'augmentation de la concentration en sel s'accompagne d'une hausse du ratio d'hydratation et d'une baisse du couple de torsion durant le phénomène d'agglomération humide des particules. Cette observation laisse suggérer que l'addition de sel empêche ou limite la genèse des forces de cohésion entre particules qui se traduit par une baisse du couple de torsion. Le sel est bien connu pour son caractère hygroscopique important. Ainsi, le sel ajouté mobilise une grande proportion d'eau ce qui diminue la mouillabilité des particules de semoules ou de farines qui exigent alors des ratios d'hydratation plus important pour l'agglomération.

Concernant la farine d'orge, les ratios d'hydratation sont encore plus élevés que pour la semoule de blé dur et à l'inverse, les couples de torsion sont plus faibles que ceux de la SBD probablement en raison de la forte teneur en fibre de la FO comparée à la SBD.



(I)



(II)

Figure 32. Evolution du couple moyen de torsion en fonction du ratio de mouillage (L/S) pendant l'agglomération humide de la semoule de blé dur (I) et de la farine d'orge (II) à différentes concentrations en sel (NaCl) dans l'eau d'hydratation

3.2. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus à l'échelle laboratoire

Les résultats de caractérisation des agglomérats humides obtenus dans le granulateur Mi-Pro® sont consignés dans le tableau 11 et la figure 33. Nous remarquons que la teneur en eau des agglomérats à l'état humide diminue avec l'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'hydratation. Cette diminution n'est significative ($p < 0,05$) qu'à une concentration égale ou supérieure à 6,4 % avec la semoule de blé dur ; elle passe de 33,30 g/100 g m.s. avec de l'eau douce à 30,96 g/100 g m.s. avec une eau à 6,4 % en sel. A de très fortes concentrations en sel (eau saturée en sel), la baisse de la teneur en eau se montre plus accentuée et affiche une valeur de 27,55 g/100 g m.s.

Avec la farine d'orge, le même résultat a été constaté mais la diminution de la teneur en eau commence à être significative ($p < 0,05$) à partir d'une concentration en sel de 1,6 %. Avec cette dernière, la teneur en eau des agglomérats obtenus est de 43,08 g/100 g m.s. et la diminution progresse pour être plus nette avec une eau saturée en sel pour afficher une valeur de 37,92 g/100 g m.s. La teneur en eau été également déterminée dans les différentes fractions granulométriques séparées par tamisage. Nous pouvons souligner que les fractions les plus grosses contiennent des taux d'humidité les plus élevées. A partir de là, nous pouvons peut être dire que plus la particule est fine, plus sa réactivité avec l'eau salée diminue.

Pour le rendement en agglomération, nous pouvons dire que l'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'hydratation réduit le rendement du roulage de la semoule de blé dur et de la farine d'orge. Par ailleurs, il semble que le taux de la fraction pâteuse diminue sensiblement. La discordance de ces deux constats peut être expliquée par le fait que la présence du sel entraîne l'apparition des particules non agglomérées et la baisse du taux des fractions pâteuses. Ceci peut être dû à la baisse de la mouillabilité et la limitation de la formation des forces de cohésion (ponts visqueux) entre les particules natives et les différentes structures ainsi formés. [Couvoul *et al.*, \(2018\)](#) ont rapporté que les ions des sels interagissent avec les charges ioniques des protéines et jouent ainsi le rôle de contre-ions. Ces derniers forment un écran qui empêche les molécules de protéines d'interagir entre elles d'une part, et avec d'autres constituants tel que l'amidon d'une autre part. De précédentes études menées sur les interactions entre l'amidon et les électrolytes font mention de leurs influences sur le phénomène de gélatinisation ([Oosten, 1982; 1990; Lii et Lee, 1993; Lai *et al.*, 2001](#)), elles admettent que les anions entraînent la rupture des liaisons hydrogènes.

L'effet du sel se traduit également sur la taille des agglomérats formés. Nous pouvons constater que le diamètre médian (d_{50}) des agglomérats humides diminue significativement ($p < 0,05$) avec l'augmentation de la concentration en sel. Avec la semoule de blé dur, le d_{50} passe de 1804,58 μm avec de l'eau douce à 1608,61 μm avec une concentration en sel de 1,6 %. Cette baisse est amplifiée avec de fortes concentrations en sel ; nous constatons que l'agglomération avec une eau saturée en sel donne des agglomérats avec un d_{50} de 1267,15 μm . La même observation a été notée avec la farine d'orge ; la taille des agglomérats obtenus avec une concentration en sel de 1,6 % est de 1455,99 μm en présentant une différence significative ($p < 0,05$) avec le témoin (FO/ 0 % NaCl). Ensuite, cette baisse continue avec l'augmentation des concentrations en sel jusqu'à ce qu'on atteigne un d_{50} de 1197,35 μm avec une eau entièrement saturée avec du sel. Ces résultats sont vraisemblablement liés au mécanisme de croissance par agglomération. [Jimenez-Munguia \(2007\)](#) a rapporté que la taille des agglomérats augmente suite à la formation des liaisons visqueuses entre les particules, il ne peut donc y avoir croissance que s'il y a suffisamment de ponts visqueux (ponts liquides mobiles et non mobiles) à leur surface. En plus du diamètre médian (d_{50}), la distribution de taille des agglomérats humides a été également déterminée et les résultats sont représentés dans la figure 33-a.b. Il ressort que l'augmentation de la concentration en sel élargit la distribution de taille avec la semoule de blé dur en favorisant la production des agglomérats de tailles avoisinant 630 et 1000 μm en faveur de ceux ayant une taille de 1600 et 2500 μm . Nous pouvons également noter que la fraction de la semoule non agglomérée reste plus importante avec l'augmentation de la concentration en sel. Dans le cas de la farine d'orge et dans les mêmes conditions de concentration en sel, la distribution de taille se resserre avec l'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'hydratation. Les agglomérats ayant une taille de 1600 μm sont les plus abondants à chaque fois que la concentration en sel augmente.

Pour la densité des agglomérats humides, il s'avère que l'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'hydratation entraîne un décroissement de la densité. Ceci n'est significatif ($p < 0,05$) qu'à une concentration de 3,2 % en sel avec la semoule de blé dur et les densités aérée et tassée enregistrées sont 0,520 et 0,590 g/cm^3 respectivement. Avec la farine d'orge, la baisse de la densité est significative ($p < 0,05$) même à faible concentration en sel (1,6 %) pour afficher des valeurs de 0,498 et 0,575 g/cm^3 pour les densités aérée et tassée respectivement. Lorsque les conditions de concentration en sel sont encore plus poussées (saturation de l'eau d'hydratation en sel), les agglomérats obtenus ont été nettement moins denses. La baisse de la densité des agglomérats obtenus peut également s'expliquer par la diminution du diamètre

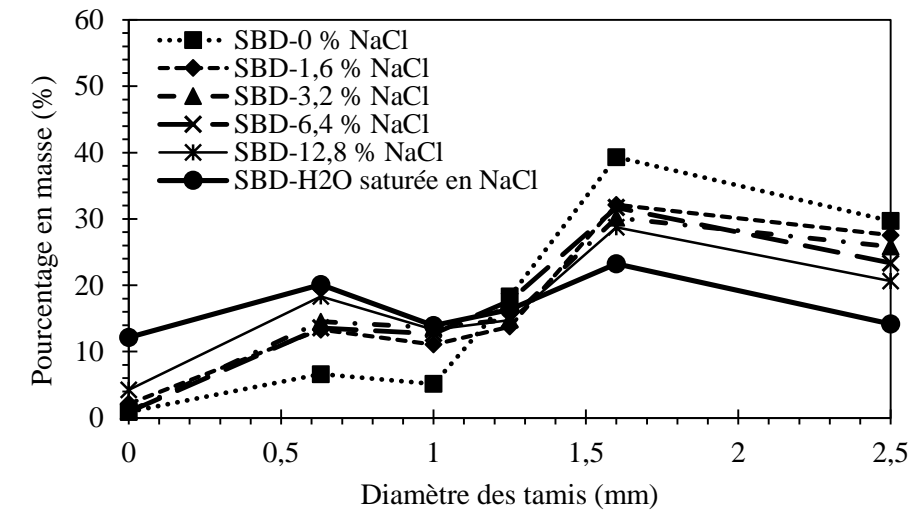
médian (d_{50}) comme il a été démontré dans les travaux de [Bellocq *et al.* \(2017a\)](#). Nous pouvons souligner également qu'avec une eau douce, les particules de la poudre céréalière présentent une réactivité élevée avec le liquide d'hydratation et par conséquent une mouillabilité élevée. Ceci entraîne la solubilisation des surfaces des particules natives et la gélification des entités protéiques et amylicées donnant formation des ponts visqueux et modifications morphologiques des particules natives. Suite aux modifications hydro-texturales, l'espace inter-particulaire se resserre et l'agglomérat ainsi formé sera plus dense. Par contre et en présence du sel dans l'eau d'hydratation, la réactivité du liquide d'hydratation avec la semoule et la farine est modifiée. L'augmentation des concentrations en sel engendre une augmentation de l'angle de contact, une diminution de la tension superficielle et une baisse de la mouillabilité. Dans de telles conditions, les particules natives de la semoule ou de la farine restent insuffisamment hydratées. Par conséquent, la solubilisation des composés de semoule et de farine reste limitée et la morphologie des particules natives n'est pas fortement modifiée. Ceci permet de garder les espaces inter-particulaires sans qu'ils soient occupés par les gels visqueux ou par la déformation des particules natives tout en donnant des agglomérats moins denses.

A partir de là, nous pouvons dire que l'augmentation du taux de salinité du liquide d'hydratation a pour effet la diminution de la qualité cohésive inter-granulaire lors du mélange solide-liquide. Le résultat post-granulation est la production d'agglomérats moins denses.

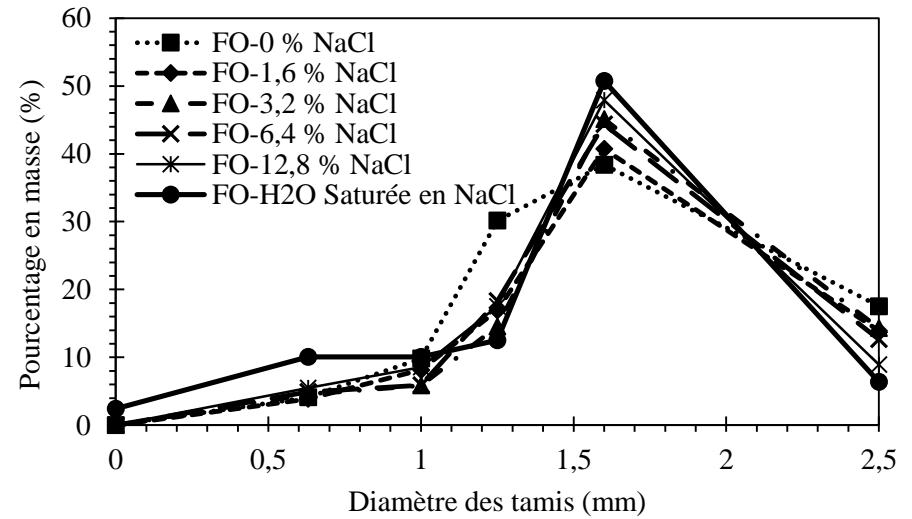
Tableau 11. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus après l'ajout du sel (NaCl)

Effet de l'ajout du sel à la semoule de blé dur						
Concentration du sel	SBD-0 % NaCl	SBD-1,6 % NaCl	SBD-3,2 % NaCl	SBD-6,4 % NaCl	SBD-12,8 % NaCl	SBD/saturé NaCl
Teneur en eau (g/100g m.s.)	33,30 (± 0,46) ^a	32,75 (± 1,15) ^a	32,08 (± 0,97) ^a	30,96 (± 1,82) ^{ab}	29,90 (± 2,07) ^{ab}	27,55 (± 2,25) ^b
Rendement d'agglomération (%)	93,77 (± 1,48) ^a	91,38 (± 1,07) ^a	89,31 (± 1,63) ^a	84,65 (± 0,92) ^b	80,07 (± 2,84) ^b	74,31 (± 1,45) ^c
d ₅₀ (µm)	1804,58 (± 24,95) _a	1608,81 (± 39,39) _a	1568,82 (± 67,62) _a	1514,85 (± 23,70) _b	1471,99 (± 57,83) _b	1267,15 (± 53,06) _c
Fraction pâteuse (%)	6,15 (± 0,34) ^a	5,64 (± 0,61) ^{ab}	5,34 (± 0,73) ^{abc}	5,14 (± 0,31) ^{abc}	4,43 (± 0,76) ^{bc}	4,02 (± 0,32) ^c
Densité aérée (g/cm ³)	0,563 (± 0,00) ^a	0,533 (± 0,01) ^a	0,520 (± 0,02) ^{ab}	0,504 (± 0,03) ^{ab}	0,496 (± 0,05) ^{ab}	0,447 (± 0,02) ^b
Densité tassée (g/cm ³)	0,635 (± 0,01) ^a	0,606 (± 0,03) ^a	0,590 (± 0,03) ^{ab}	0,558 (± 0,05) ^{ab}	0,550 (± 0,05) ^{ab}	0,495 (± 0,03) ^b
Effet de l'ajout du sel à la farine d'orge						
Concentration du sel	FO-0 % NaCl	FO-1,6 % NaCl	FO-3,2 % NaCl	FO-6,4 % NaCl	FO-12,8 % NaCl	FO/saturé NaCl
Teneur en eau (g/100g m.s.)	43,55 (± 1,30) ^a	43,08 (± 0,57) ^{ab}	41,94 (± 0,82) ^{ab}	40,65 (± 0,80) ^{bc}	39,20 (± 0,93) ^{cd}	37,92 (± 0,75) ^d
Rendement d'agglomération (%)	90,18 (± 1,14) ^a	83,59 (± 0,55) ^c	84,38 (± 1,24) ^c	86,10 (± 0,40) ^{bc}	88,37 (± 1,15) ^{ab}	89,71 (± 0,68) ^a
d ₅₀ (µm)	1680,33 (± 40,12) _a	1455,99 (± 34,03) _b	1409,82 (± 38,62) _b	1397,58 (± 80,25) _b	1345,45 (± 75,83) _{bc}	1197,35 (± 66,39) _c
Fraction pâteuse (%)	4,82 (± 2,09) ^c	13,57 (± 1,26) ^a	11,68 (± 1,21) ^{ab}	9,75 (± 0,55) ^b	4,32 (± 0,78) ^c	3,14 (± 0,89) ^c
Densité aérée (g/cm ³)	0,513 (± 0,01) ^a	0,498 (± 0,02) ^{ab}	0,483 (± 0,02) ^{ab}	0,474 (± 0,02) ^{ab}	0,464 (± 0,03) ^{ab}	0,450 (± 0,01) ^b
Densité tassée (g/cm ³)	0,593 (± 0,03) ^a	0,575 (± 0,05) ^{ab}	0,562 (± 0,05) ^{ab}	0,543 (± 0,02) ^{ab}	0,527 (± 0,02) ^{ab}	0,488 (± 0,02) ^b

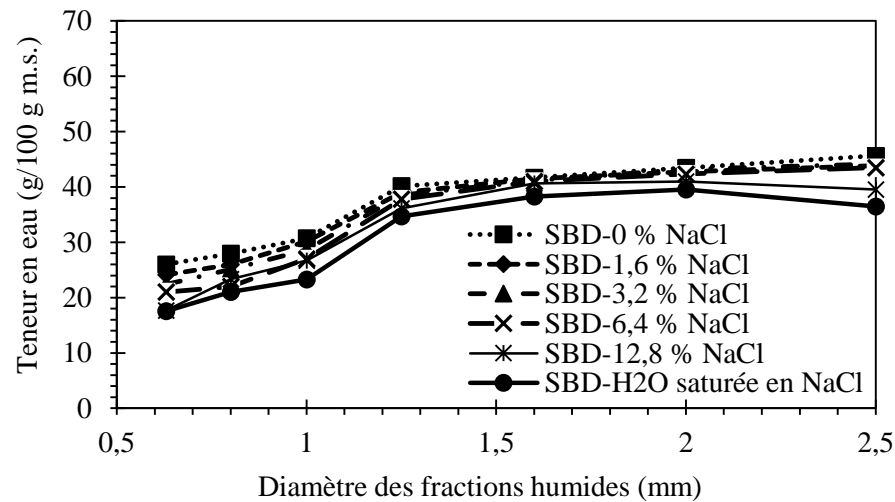
Les valeurs en ligne ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).



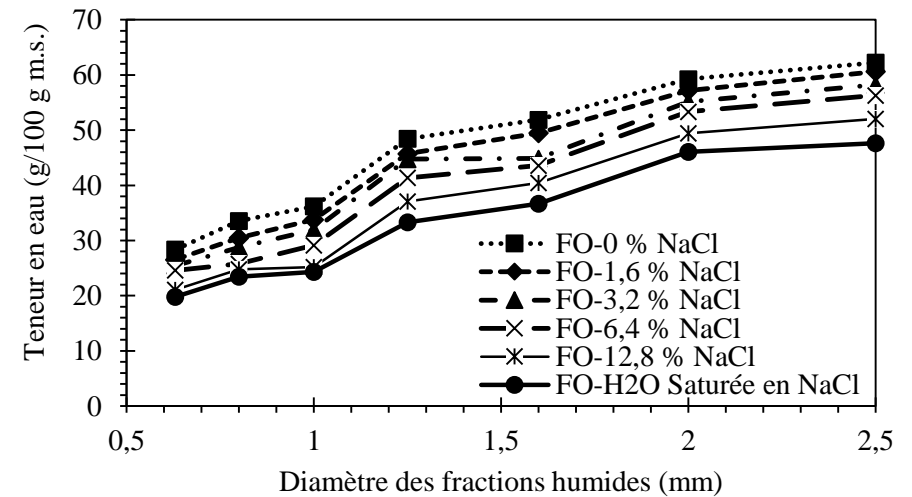
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 33. Distributions granulométriques (a) SBD-NaCl, (b) FO-NaCl et teneur en eau des fractions humides (c) SBD- NaCl, (d) FO-NaCl des agglomérats obtenus par le granulateur Mi-Pro®

3.3. Variabilité des agglomérats humides obtenus avec de l'eau salée

Les résultats de l'analyse en composantes principales de la variabilité des agglomérats humides sont représentés dans la figure 34. Les agglomérats humides sont obtenus suite à l'agglomération de la SBD et de la FO avec de l'eau d'hydratation à différentes concentrations en sel dans le granulateur Mi-Pro®. Les résultats montrent que l'ACP permet l'explication de 83,27 % de la variabilité entre les agglomérats humides. Le cercle de corrélations représenté dans la figure 34-A correspond à la projection des variables sur un plan à deux dimensions constitué par les deux premiers facteurs F1 (55,88 %) et F2 (27,39 %). Le facteur F1 est positivement corrélé avec le diamètre médian, les densités aérée et tassée, le couple de torsion et le rendement d'agglomération. Par contre, il paraît avec une corrélation négative avec le ratio d'hydratation (liquide/solide). Pour le facteur F2, il se voit clairement qu'il est positivement corrélé qu'avec la fraction pâteuse et la teneur en eau (Annexe 7). Le cercle des corrélations permet de visualiser les caractéristiques des agglomérats humides qui sont influencées par la salinité de l'eau d'hydratation lors de l'agglomération humide de la SBD et de la FO. Il est à noter que la concentration en sel de l'eau d'hydratation est négativement corrélée avec la taille des agglomérats ($P < 0,0001$; $r = - 0,68$), la densité aérée ($P < 0,0001$; $r = - 0,65$) et la densité tassée ($P < 0,0001$; $r = - 0,75$) de façon très significative et avec le rendement d'agglomération ($P < 0,0001$; $r = - 0,39$), la teneur en eau ($P < 0,0001$; $r = - 0,29$) et le couple de torsion ($P < 0,0001$; $r = - 0,31$). De plus, une corrélation positive a été soulevée entre la concentration en sel de l'eau d'hydratation et le ratio d'hydratation ($(P < 0,0001$; $r = 0,31$) (Annexe 8).

La superposition du plan des individus avec celui des variables donne le biplot qui est représenté dans la figure 34-B. Nous avons opté à la classification des différents agglomérats humides obtenus à différentes concentration en sel et nous avons regroupé les agglomérats en trois groupes différents. Le premier groupe représente les agglomérats obtenus à des concentrations en sel de 0 et 1,6 %. Ils sont associés à des valeurs très élevées en ce qui concerne la densité aérée et la densité tassée, le d_{50} , le rendement de l'agglomération, la teneur en eau et la fraction pâteuse. A travers le deuxième groupe qui contient les agglomérats humides obtenus avec l'eau d'hydratation de 3,2 ; 6,4 et 12,8 % de sel, il apparaît que l'augmentation de la concentration en sel dans l'eau d'hydratation entraîne la baisse du rendement d'agglomération, du diamètre médian, de la densité aérée et tassée, de la fraction pâteuse et de la teneur en eau. Par contre le ratio d'hydratation augmente en particulier avec la FO et le couple de torsion avec la SBD. L'amplification maximale de l'effet du sel (eau saturée en sel) donne des agglomérats de très faible compacité, plus secs, moins gros et avec un taux de la fraction pâteuse très réduit.

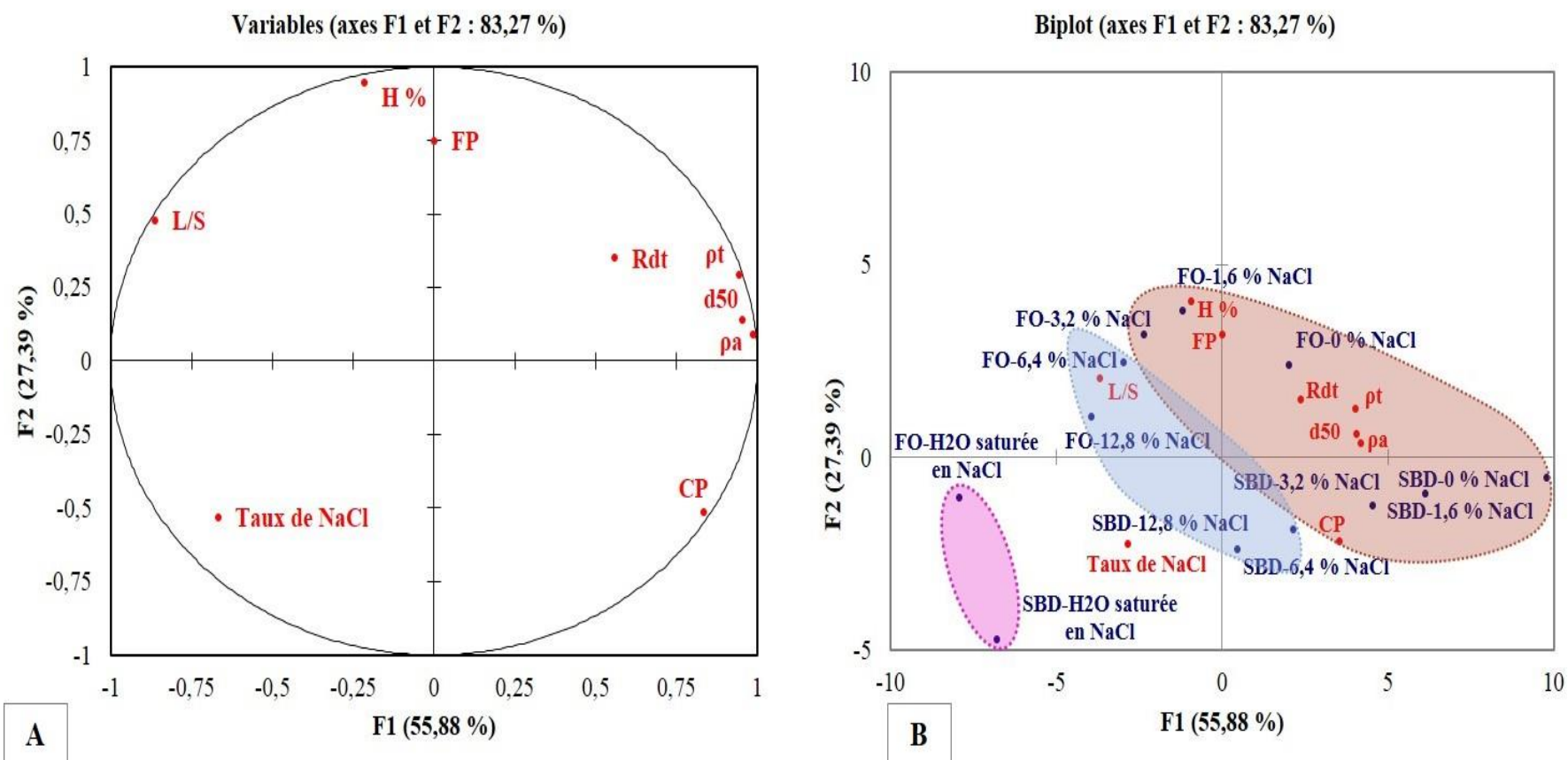


Figure 34. Analyse en composantes principales de la variabilité des agglomérats humides obtenus par agglomération de la SBD et de la FO avec une eau à différentes concentrations en sel dans le granulateur Mi-Pro® en fonction de leurs caractéristiques. (A) projection des variables sur le cercle des corrélations et (B) représentation des individus et de leurs caractéristiques. Abréviations (L/S : ratio d'hydratation, Rdt : rendement d'agglomération, H % : teneur en eau, d50 : diamètre médian, pa : densité aérée, pt : densité tassée, FP : fraction pâteuse, CP : couple de torsion)

4. Granulabilité des farines sans gluten en couscous

4.1. Propriétés intrinsèques des farines

Les propriétés intrinsèques des farines étudiées sont consignées dans le tableau 12. Suite à l'analyse de variance (ANOVA) à un seuil de signification de 0,05, les cinq farines peuvent être classées selon le ratio de densification en farines denses (farine de maïs et celle du sarrasin) et en farines moins denses (farine de manioc, d'amarante et de quinoa). Selon les indices de Carr et d'Hausner, toutes les farines sont de type granuleuse et ne sont pas trop cohésives. Il est à noter que toutes les farines présentent un écoulement moyen à l'exception de la farine de maïs. Ceci peut être confirmé par les résultats de la mesure de l'angle de talus et de l'écoulement massique, qui montrent que la farine de maïs s'écoule significativement ($p < 0,05$) d'une façon plus rapide que les autres farines qui ne présentent pas de différences significatives entre elles ($p < 0,05$).

4.2. Taille et distribution de taille des farines

La distribution granulométrique et les paramètres de taille apparaissent respectivement dans la figure 35 et le tableau 12. Les résultats montrent que les cinq farines ont des distributions de taille significativement différentes ($p < 0,05$). La farine de maïs présente les particules les plus grosses avec un diamètre médian (d_{50}) de 612 μm . La farine du manioc présente les particules les plus fines avec un diamètre médian (d_{50}) de 16,6 μm .

La figure 35 montre que les cinq farines présentent des distributions de taille différentes. Nous pouvons noter que la répartition granulométrique de la farine de maïs est centrée et de type monomodale, celle de sarrasin et du manioc sont bimodales, tandis que les farines de quinoa et d'amarante sont largement polydisperses et de type trimodales (patatoïdes).

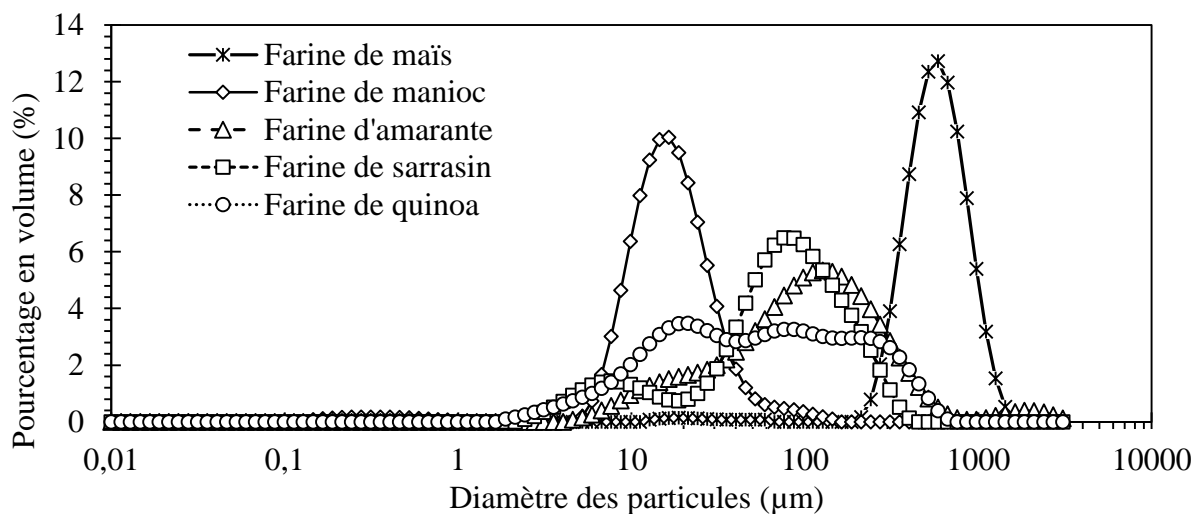


Figure 35. Distribution de taille des farines sans gluten étudiées

Tableau 12. Propriétés intrinsèques des farines sans gluten

Farine	Maïs	Manioc	Amarante	Sarrasin	Quinoa
Teneur en eau (% m.s.)	12,05 (± 0,06) ^a	12,50 (± 0,10) ^c	10,40 (± 0,61) ^b	11,46 (± 0,81) ^a	8,77 (± 0,58) ^{ab}
Densité aérée (g/cm ³)	0,650 (± 0,00) ^a	0,487 (± 0,00) ^c	0,466 (± 0,01) ^c	0,585 (± 0,00) ^b	0,468 (± 0,00) ^c
Densité tassée (g/cm ³)	0,745 (± 0,07) ^a	0,585 (± 0,00) ^b	0,584 (± 0,02) ^b	0,722 (± 0,02) ^a	0,573 (± 0,01) ^b
Densité vraie (g/cm ³)	1,465 (± 0,00) ^a	1,515 (± 0,00) ^a	1,433 (± 0,00) ^a	1,463 (± 0,00) ^a	1,445 (± 0,00) ^a
Ratio de densification (%)	50,88 (± 4,93) ^a	38,6 (± 0,18) ^b	40,8 (± 1,30) ^b	49,4 (± 1,41) ^a	39,7 (± 0,71) ^b
Porosité aérée (%)	55,60 (± 0,17) ^c	67,82 (± 0,08) ^a	67,48 (± 0,92) ^a	59,98 (± 0,82) ^b	67,62 (± 0,37) ^a
Porosité tassée (%)	49,10 (± 4,93) ^b	61,40 (± 0,18) ^a	61,72 (± 1,30) ^a	50,66 (± 1,41) ^b	60,34 (± 0,71) ^a
Angle de talus (°)	46,43 (± 1,46) ^a	49,90 (± 1,01) ^a	52,10 (± 1,54) ^a	50,50 (± 2,70) ^a	48,00 (± 7,57) ^a
Ecoulement massique (g/s)	11,39 (± 0,01) ^c	1,79 (± 0,12) ^a	1,26 (± 0,23) ^a	2,94 (± 0,09) ^b	1,78 (± 0,52) ^a
Indice de Carr	12,75 (± 8,21) ^a	16,75 (± 0,33) ^a	20,21 (± 1,31) ^a	18,98 (± 2,26) ^a	18,32 (± 0,54) ^a
Ratio d'Hausner	1,15 (± 0,11) ^a	1,20 (± 0,00) ^a	1,25 (± 0,02) ^a	1,23 (± 0,03) ^a	1,22 (± 0,01) ^a
d ₅₀ (µm)	612 (± 11,8) ^a	16,6 (± 0,70) ^c	114 (± 5,54) ^b	80,4 (± 0,29) ^c	57,7 (± 1,30) ^d
d ₁₀ (µm)	367 (± 6,51) ^a	9,08 (± 0,19) ^c	20,8 (± 0,46) ^b	10,50 (± 0,09) ^c	10,40 (± 0,07) ^c
d ₉₀ (µm)	1010 (± 11,8) ^a	31,50 (± 3,12) ^c	357,50 (± 39,44) ^b	211 (± 5,03) ^d	312 (± 17,5) ^c
Dispersion granulométrique DG [(d ₉₀ -d ₁₀)/d ₅₀]	1,04 (± 0,01) ^c	1,35 (± 0,12) ^d	2,98 (± 0,26) ^b	2,49 (± 0,19) ^c	5,23 (± 0,19) ^a

Les valeurs en ligne ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

4.3. Microstructure des particules de farines

La microstructure et l'état de surface des particules élémentaires des cinq farines ont été identifiés par microscopie électronique environnemental (ESEM) et les résultats sont présentés dans la figure 36. Les résultats montrent que les particules constituant la farine de maïs ont une forme irrégulière, elles peuvent être sphériques ou allongées (Figure 36.I.A). La surface des particules de la farine de maïs est principalement composée de grains d'amidon sphériques de taille variant entre 5 et 20 μm . Ces grains d'amidon sont bien arrangés et semblent disposés sur une matrice assez diffuse. D'importants espaces inter-grains d'amidon et quelques fentes en surface de la farine sont observés (Figure 36.II.A). Dans la farine de manioc, deux populations de grains d'amidon peuvent être distinguées : des gros grains entre 10 et 25 μm de diamètre, et des petits grains de 1 à 5 μm de diamètre (Figure 36.I.B). Certains grains d'amidon se voient à l'état endommagé ce qui peut être lié aux conditions de mouture du manioc. Pour la farine d'amarante, les particules ont une forme irrégulière. De petits grains d'amidon sphériques peuvent être distingués sur des surfaces lisses avec une taille allant de 1 à 6 μm . il est à noter également qu'il existe des structures fibrillaires qui pourraient provenir du broyage des enveloppes des grains (Figure 36.I.C). Les particules élémentaires de la farine de sarrasin sont très irrégulières en terme de forme, sont plutôt allongés avec des arêtes bien définies (Figure 36.I.D). Leurs surfaces sont essentiellement composées de grains d'amidon sphériques ayant une taille de 1 à 10 μm (Figure 36.II.D). Les particules natives de la farine de quinoa sont très hétérogènes en terme de taille et de formes ; de très petites, moyenne et quelques grosses particules. En outre, certaines structures diffuses et feuilletées sont également observées (Figure 36.I.E). Les structures diffuses peuvent représenter les matrices protéiques sur lesquelles se trouvent deux populations d'amidon de taille de 1 à 2 μm et de 10 à 20 μm (Figure 36.II.E).

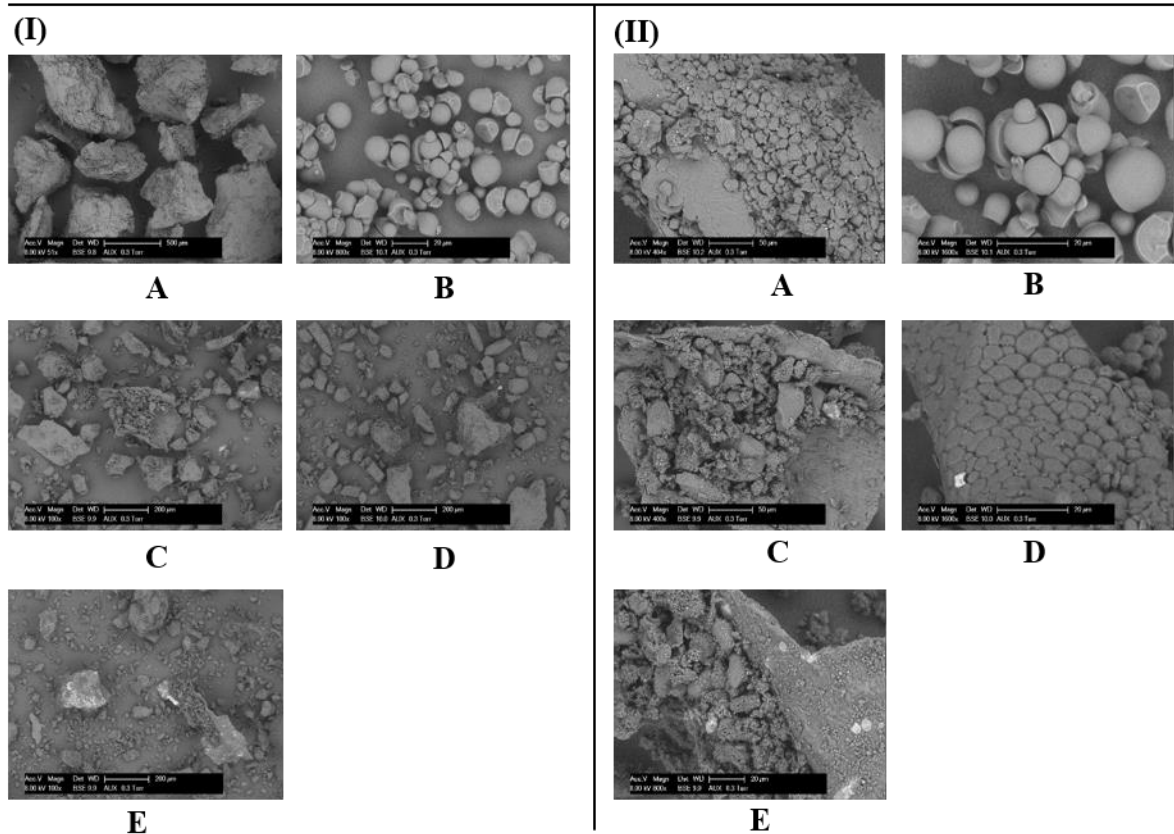


Figure 36. Microstructure (I) et état de surface (II) par microscopie électronique environnemental (ESEM) des particules élémentaires des farines sans gluten ; (A) maïs, (B) manioc, (C) amarante, (D) sarrasin et (E) quinoa

4.4. Propriétés d'hydratation

Les propriétés d'hydratation ont été déterminées par deux techniques : la capacité de gonflement dans l'eau et à partir des isothermes de sorption déterminés par méthode gravimétrique (DVS).

4.4.1. Indice de gonflement

La capacité de gonflement dans l'eau a été évaluée par la détermination de l'indice de gonflement et les résultats sont représentés dans la figure 37. Il ressort clairement que les cinq farines étudiées se comportent différemment dans l'eau ; une différence significative ($p < 0,05$) peut être notée et la farine de maïs se présente avec un indice de gonflement de 176,80 ml/100g suivi par celui de sarrasin, d'amarante et de quinoa qui absorbent respectivement un volume de 150,18, 79,30 et 69,39 ml d'eau par 100 g de matière sèche. Quant à la farine de manioc, nous pouvons constater qu'elle présente un indice de gonflement négatif qui est de -105,26 ml/100g.

Ce résultat signifie que le lit de farine de manioc se rétrécit suite au contact avec l'eau et le volume qu'il occupe diminue au lieu de gonfler suite à la compaction des particules.

Le volume de matière (manioc) diminue par tassement certainement du fait de sa grande richesse en amidon (88 %), très pauvre en protéines (0,5 g/100 g m.s.) et présente une granulométrie très faible ($d_{50} = 16,6 \mu\text{m}$) combinée à une densité vraie élevée ($1,515 \text{ g/cm}^3$). Egalement il semble que les fines particules de la farine de manioc augmentent de masse volumique après trempage dans l'eau ce qui augmente leur aptitude au tassement par effet pesanteur. Il semblerait que l'absence de protéines et de fibres peut constituer un enchevêtrement dans le milieu empêchant la stratification des particules, soit responsable de l'indice de gonflement négatif de la farine de manioc.

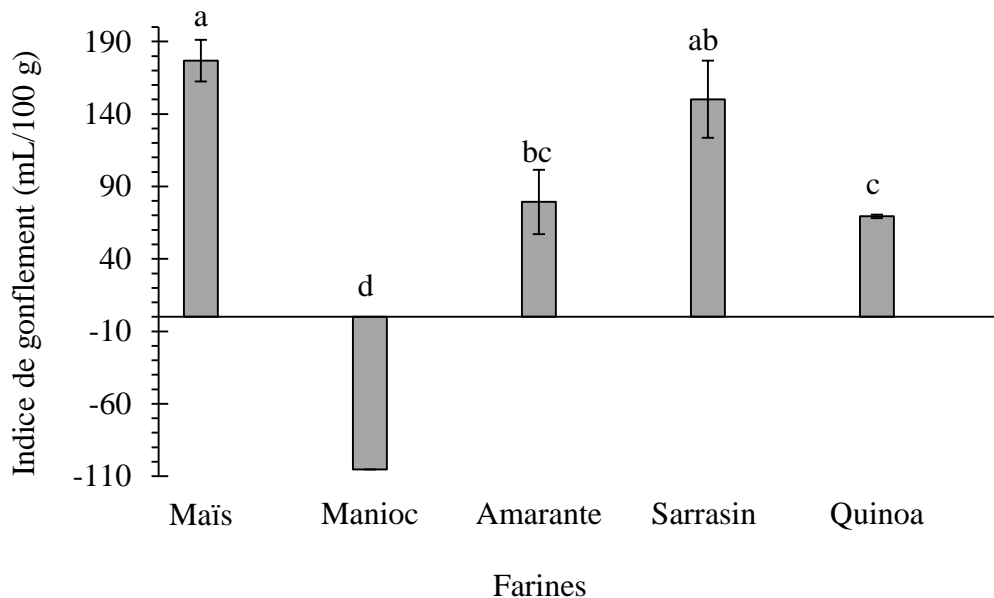


Figure 37. Indice de gonflement des différentes farines sans gluten

4.4.2. Cinétique de prise en eau

Les isothermes de sorption de la vapeur d'eau apparaissent dans la figure 38. L'allure des courbes représentant la stabilisation de l'eau à l'intérieur des particules de farines en fonction de l'humidité relative (au cours de l'adsorption) est similaire pour les cinq farines analysées. Les isothermes ainsi obtenus sont de forme sigmoïdales et peuvent être assimilés à la catégorie des isothermes de types II (Sing *et al.*, 1985 ; Rouquerol *et al.*, 2003 ; Rouquerol et Rouquerol, 2014) où l'on peut observer une augmentation très progressive de la quantité d'eau adsorbée en fonction de la pression relative d'équilibre. Il est à signaler que les isothermes de sorption obtenus dans ce travail sont comparables à ceux obtenus dans le présent travail avec la semoule de blé dur, la farine de blé tendre et la farine d'orge et à ceux rapportés par (Lagoudaki *et al.*,

1993; Hébrard *et al.*, 2003; Erbaş *et al.*, 2005; Ocieczek, 2007). Selon Rondet (2008) et Delcour et Hosney (2010), ce type d'isotherme est obtenu avec des adsorbants non poreux ou macroporeux à la surface desquels la couche adsorbée s'épaissit progressivement.

De façon schématique, ces isothermes peuvent être partagées en trois domaines (I, II et III) : La première zone convexe (domaine I) correspond à la fixation d'une couche monomoléculaire d'eau sur les sites les plus hydrophiles. Erbaş *et al.* (2005) ont rapporté que les molécules d'eau sont absorbées par les sites hydrophiles des différents composés de farines tels que l'amidon et les protéines suite à la formation des liaisons d'hydrogène. Les énergies de liaison sont importantes et la mobilité des molécules d'eau adsorbées en surface est alors très faible. Dans la deuxième zone (domaine II), la courbe est quasi linéaire et s'étend jusqu'à des humidités relatives d'environ 80 %. La fixation des molécules d'eau se poursuit progressivement et forme des multicouches grâce aux liaisons de type Van-der-Waals. Dans la troisième et la dernière zone concave (domaine III), la poursuite de l'absorption de l'eau peut être notée avec l'augmentation de l'humidité relative, mais également la condensation capillaire. Dans cette section, nous pouvons noter que la farine de manioc et de quinoa absorbent plus de vapeur d'eau par rapport aux autres farine (maïs, amarante et sarrasin) et ce à partir des humidités relatives dépassant 80 %.

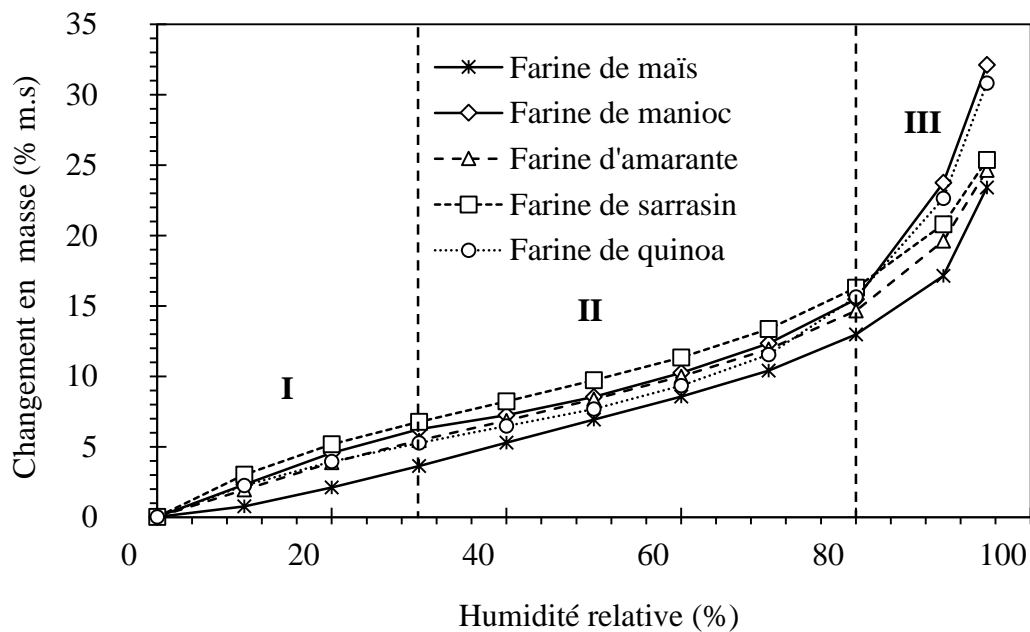


Figure 38. Isothermes de sorption des farines sans gluten à 25 °C

Les cinq farines peuvent être comparées en fonction des temps nécessaires pour atteindre l'équilibre qui sont consignés dans la figure 39. Il apparaît clairement que la farine de manioc et celle du quinoa prennent significativement ($p < 0,05$) plus de temps que les autres farines pour atteindre l'équilibre à une humidité relative de 95 %, ils sont de l'ordre de 23,44 h pour la farine de manioc et 22,98 h pour la farine de quinoa.

Concernant les principaux composants biochimiques (amidon, protéines et fibres), la farine de manioc et de quinoa présentent de nettes différences (Tableau 4, page 39). Toutefois, les résultats indiqués dans le tableau 12 (page 100) font apparaître que la plus part des caractéristiques physiques sont comparables pour la farine de manioc et de quinoa. Il semble que la faible granulométrie des particules favorise l'absorption. Il paraît donc que plus les farines de manioc et de quinoa ont une grande aptitude à absorber plus d'eau plus les temps nécessaires à l'obtention de l'équilibre sont élevés. Ces farines très hygroscopiques n'arrivent à saturation en vapeur d'eau qu'à des temps plus longs.

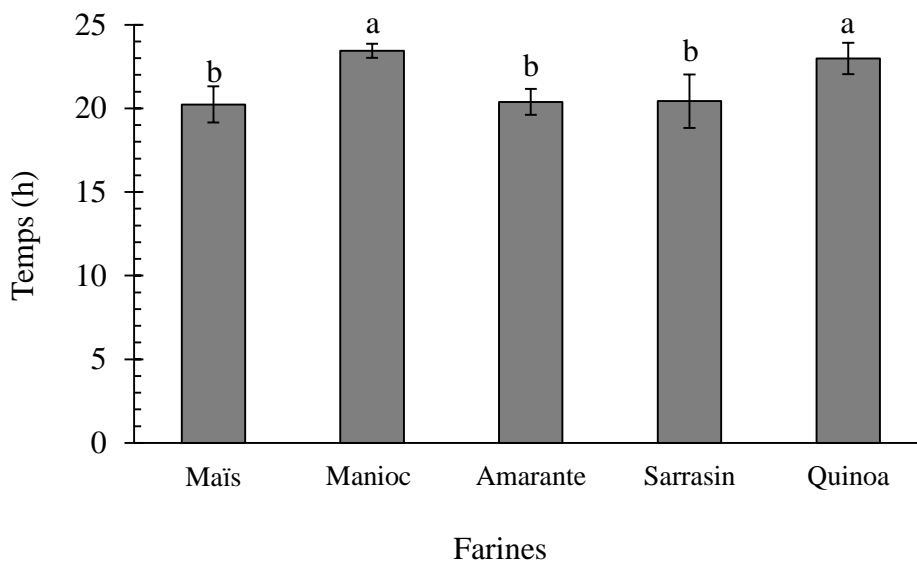


Figure 39. Temps nécessaire pour atteindre l'équilibre à une humidité relative de 95 % pendant l'absorption de la vapeur d'eau par les farines

4.5. Propriétés rhéologiques d'agglomération

Le taux de saturation des agglomérats et l'état de structure lors de l'agglomération humide peuvent être décrits par les caractéristiques rhéologiques du mélange (farine/eau) (Hancock *et al.*, 1991 ; Hancock *et al.*, 1992). Ces dernières sont définies par les variations du couple moyen de torsion pendant le mélange du solide (farine) et du liquide d'hydratation (eau). Le couple

moyen de torsion a été déterminé à l'aide du rhéomètre à faible taux de cisaillement (MTR-Caleva®).

Selon le taux d'hydratation et les forces d'agitation, le mélange peut développer des structures de différentes tailles qui peuvent coexister probablement en raison de l'hétérogénéité de répartition du liquide d'hydratation entre les particules de poudres. Cette hétérogénéité de répartition du liquide d'hydratation entre particules de la farine génère des transferts de quantité de mouvement différents dans le system. On peut trouver des particules natives, des structures agglomérées et quelques amas de pâtes (Ramachandran *et al.*, 2008; Rondet *et al.*, 2013).

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 40 qui donne l'évolution du couple moyen de torsion en fonction du volume de l'eau ajoutée. Il apparait clairement que quelle que soit la farine utilisée, les mêmes transitions d'état en fonction du ratio de mouillage (X) et du cisaillement imposé sont observées. Le même résultat a été noté dans les travaux de Hébrard *et al.* (2003). A partir de l'évolution du couple moyen, quatre états de structure des agglomérats peuvent être identifiés. Ils sont délimités par les ratios d'hydratation (L/S) : X1, X2 et X3.

- 1) $X1 < X$: à des taux d'hydratation inférieurs à 20 %, le couple moyen de torsion reste nul et toutes les farines sont considérées comme des solides divisés secs.
- 2) $X1 < X < X2$: le couple s'accroît progressivement. Des ponts liquides se créent entre les particules de semoule et des agglomérats se forment. Ces agglomérats ont une résistance aux cisaillements supérieure à celle du solide sec. Ce stade correspond à l'état funiculaire.
- 3) $X2 < X < X3$: Au-delà de 0,35 ml/g, on observe un brusque décrochage de la pente pour atteindre le couple moyen à sa valeur maximale qui correspond à un ratio d'hydratation de X3. L'augmentation de la consistance du mélange peut être due à la coalescence des agrégats suite à l'ajout de l'eau d'hydratation (Hébrard *et al.*, 2003). A ce stade la transformation des agglomérats de farines en pâte peut être notée. Ce stade correspond à l'état capillaire.
- 4) $X3 < X$: Les apports d'eau supplémentaires entraînent la dilution du système, d'où l'affaissement continu du couple moyen. Selon les travaux de Pietsch (1997), nous pouvons conclure que ce stade correspond à l'état de goutte.

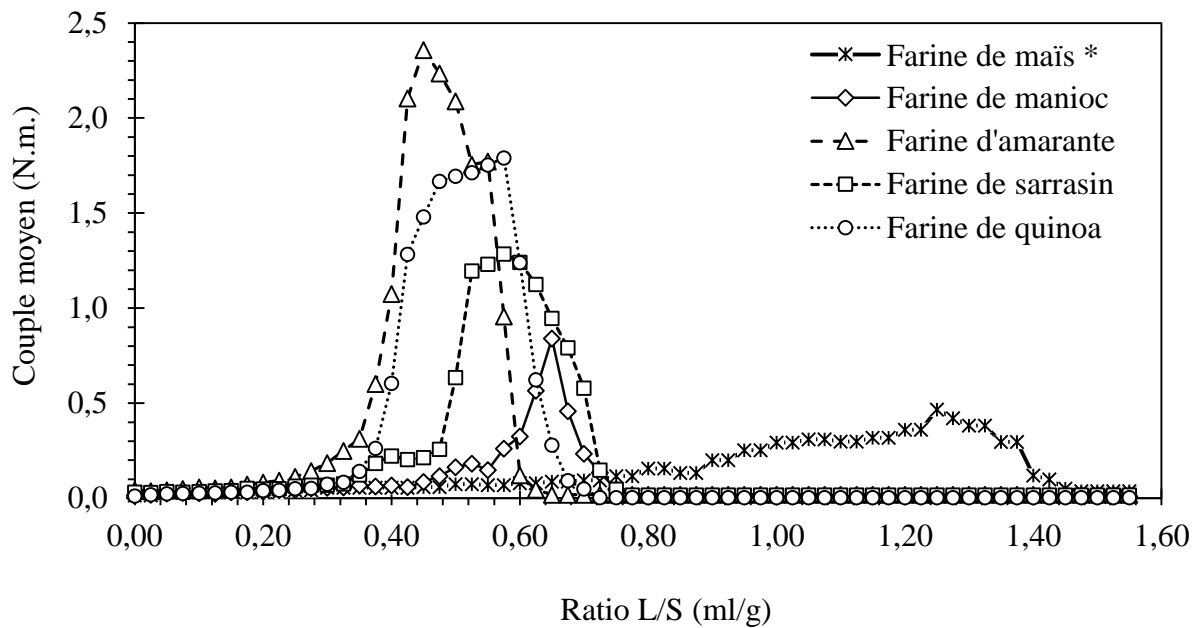


Figure 40. Evolution du couple moyen de torsion en fonction du ratio de mouillage (L/S) pendant l'agglomération humide des farines sans gluten

Pour chaque farine étudiée, nous avons défini les taux d'hydratation (X1, X2 et X3) et les couple moyens de torsion respectifs. Les résultats sont indiqués dans le tableau 13.

Les premières variations des couples moyens ont été enregistrées à des taux d'hydratation (X1) de 0,500 ml/g pour la farine de maïs et 0,350 ml/g pour la farine de manioc. Avec la farine de sarrasin et celle de quinoa, les taux d'hydratation respectifs de 0,225 et 0,250 ml/g ont permis le début de l'augmentation du couple moyen. Pour la farine d'amarante, un taux d'hydratation de 0,175 ml/g était suffisant pour développer des forces de cohésion dans le mélange (farine/eau) en donnant le début d'augmentation du couple moyen. Jusqu'à ce taux d'hydratation (X1), la croissance des agglomérats n'est pas encore notable et les ponts liquides ne sont pas encore créés entre les particules natives des farines. Selon [Ennis et Litster \(1997\)](#), cela peut être dû à l'absorption ponctuelle de l'eau d'hydratation sur les particules de farines. Cette phase correspond à la nucléation.

Tableau 13. Identification des différents états de structure en fonction du ratio d'hydratation et du couple de torsion moyen correspondant

Farines		Maïs	Manioc	Amarante	Sarrasin	Quinoa
Ratio d'hydratation L/S (ml/g)	X ₁	0,500 (± 0,02) ^a	0,350 (± 0,03) ^b	0,175 (± 0,01) ^d	0,225 (± 0,03) ^{cd}	0,250 (± 0,02) ^c
	X ₂	1,050 (± 0,03) ^a	0,600 (± 0,02) ^b	0,375 (± 0,01) ^d	0,475 (± 0,02) ^c	0,475 (± 0,01) ^c
	X ₃	1,250 (± 0,05) ^a	0,650 (± 0,02) ^b	0,450 (± 0,04) ^c	0,575 (± 0,04) ^b	0,575 (± 0,03) ^b
Couple de torsion (N.m)	X ₁	0,075 (± 0,034) ^a	0,068 (± 0,033) ^a	0,073 (± 0,025) ^a	0,051 (± 0,020) ^b	0,051 (± 0,028) ^b
	X ₂	0,310 (± 0,105) ^d	0,325 (± 0,059) ^c	0,601 (± 0,060) ^b	0,257 (± 0,069) ^e	1,668 (± 0,060) ^a
	X ₃	0,466 (± 0,068) ^e	0,841 (± 0,040) ^d	2,357 (± 0,056) ^a	1,285 (± 0,232) ^c	1,791 (± 0,203) ^b

Les valeurs en ligne ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

A un taux d'hydratation X2, le couple moyen de torsion enregistré par le MTR-Caleva® augmente avec les cinq farines étudiées mais à des valeurs significativement différentes ($p < 0,05$). L'augmentation est plus notable avec la farine de quinoa qui a donné un couple de torsion de 1,668 N.m pour un taux d'hydratation de 0,375 ml/g. En deuxième position, le couple de torsion enregistré avec la farine d'amarante est de 0,601 N.m à un taux d'hydratation de 0,375 ml/g. Par ailleurs, les autres farines ont enregistré des couples de torsion plus faibles variant entre 0,257 et 0,325 N.m. Cette deuxième étape correspond au début de l'agglomération, où les nucléi sont associés aux particules natives pour former des agglomérats qui croissent et se consolident sous l'effet du mélange. Les ratios d'hydratation X2 ont été sélectionnés comme un taux d'hydratation optimal lors de la mise en forme des grains de couscous à l'échelle laboratoire (sur le granulateur Mi-Pro®) et à l'échelle artisanale.

Dans la troisième étape, les propriétés rhéologiques des cinq farines évoluent et les forces de cohésion atteignent le maximum. Cette étape peut être caractérisée par l'enregistrement d'un couple de torsion le plus élevé avec la farine d'amarante (2,357 N.m) pour un ratio d'hydratation de 0,450 ml/g et ce est vraisemblablement en raison de sa teneur élevée en fibres (9,5 g/100 m.s.), en protéines (15,5 g/100 g m.s.) et en lipides (7,1 g/100 g m.s.) qui peuvent favoriser l'accroissement de la consistance du mélange. Ensuite, viennent les farines de quinoa et du sarrasin pour un ratio d'hydratation de 0,575 ml/g. L'agglomération humide de la farine de manioc a permis le développement d'une force de cohésion entre les agglomérats en donnant un couple de torsion de 0,841 N.m pour un taux d'hydratation de 0,650 ml/g. Pour atteindre la cohésion maximale traduite par un couple de torsion de 0,466 N.m avec la farine de maïs, un taux d'hydratation de 1,250 doit être assuré.

Selon [Knight \(2004\)](#) et [Rondet et al. \(2013\)](#), l'augmentation du taux d'hydratation à des niveaux très élevés dépassant la limite plastique entraîne la saturation des agglomérats par le liant. A partir de là, la transition agglomérats/pâte peut être notée. Ce même résultat a été constaté avec les taux d'hydratation dépassant X3 avec toutes les farines étudiées.

Avec toutes les farines, la résistance aux forces de cisaillement entre les particules natives augmente sous le mélange et l'ajout de l'eau afin de donner des agglomérats humides. Les mêmes propriétés rhéologiques ont été observées dans les travaux d'[Hébrard et al. \(2003\)](#) durant l'agglomération humide de la semoule de blé dur.

Les résultats obtenus à partir du MTR-Caleva® permettent de conclure que l'agglomération humide des cinq farines étudiées peut donner des éventuels agglomérats pouvant être comparés

aux grains de couscous. Ceci reste possible dans la mesure de ne pas dépasser le taux d'hydratation optimal.

Les résultats obtenus montrent que les ratios d'hydratation correspondants aux couples moyens de torsion différents selon le type de poudre. Les farines de maïs et de manioc exigent des ratios d'hydratation plus élevés qui sont respectivement 1,25 et 0,65 ml/g correspondants à des couples de torsion de 0,466 et 0,841 N.m. Ces caractéristiques résultent sans doute de la grosseur des particules pour la farine maïs ($d_{50} = 612 \mu\text{m}$) et de la finesse des particules de la farine de manioc ($d_{50} = 16,6 \mu\text{m}$). Ainsi, dans le cas de la farine de maïs, les grosses particules interagissent moins entre elles de par leur grosseur et colmatent difficilement les unes contre les autres. Pour le manioc, la grande finesse des particules ne semble pas favorable à la genèse des nuclei. D'ailleurs, si on pourrait imaginer que l'élévation de la valeur du couple de torsion renseigne sur l'aptitude à l'agglomération, les faibles valeurs du couple de torsion pour les farines de maïs et de manioc laisseraient penser que ces farines présentent de faibles aptitudes à cette transformation. A côté de la granulométrie, la composition biochimique du maïs (88 g/100 g m.s. d'amidon et 0,5 g/100 g m.s. de protéines) semble influencer le phénomène d'agglomération.

Pour confirmation de la granulabilité des farines sans gluten, l'agglomération humide a été réalisée sur le granulateur Mi-Pro[®] et les résultats seront exposés ci-dessous.

4.6. Caractéristiques des agglomérats humides obtenus à l'échelle laboratoire

Le procédé d'agglomération humide a été réalisé à l'échelle laboratoire avec un granulateur Mi-Pro[®]. Les ratios d'hydratation notés au stade funiculaire lors de la granulation dans le MTR-Caleva[®] pour chaque farine ont été adoptés.

Dans l'ensemble des résultats obtenus et comme le montre la figure 41, il a été constaté que toutes les farines sélectionnées peuvent donner des grains de couscous à l'exception de la farine de manioc. Suite aux mouvements d'agitation et à l'ajout de l'eau, le lit de farine de manioc colmate sur le long de la paroi du bol de granulation et les pales tournaient dans le vide. Les particules élémentaires de la farine de manioc ne pouvaient pas développer les forces de cohésion entre elles. Le comportement particulier de la farine de manioc durant l'opération d'agglomération peut avoir plusieurs origines. La composition biochimique de la farine de manioc montre sa grande richesse en amidon (88 g/100 g m.s.), sa pauvreté en protéines (0,5 g/100 g m.s.), en fibres (0,5 g/100 g m.s.) et absence totale de lipides. Il semble probable que cette composition joue en défaveur du phénomène d'agglomération humide. Par ailleurs, la

grande finesse des particules de la farine de manioc ($d_{50} = 16,6 \mu\text{m}$) peut être responsable du moins en partie de son mauvais comportement durant l'opération d'agglomération humide. Selon [Bellocq et al. \(2018a\)](#), les teneurs élevées en protéines pourraient renforcer la structure en favorisant le caractère collant entre les particules natives.



Figure 41. Agglomérats humides issus des farines sans gluten (A : maïs, B : amarante, C : sarrasin et D : quinoa) obtenus par le granulateur Mi-Pro®

Les paramètres caractérisant les agglomérats humides (teneur en eau, rendement d'agglomération, diamètre médian et densités aérée et tassée) sont regroupés dans le tableau 14. A travers ces résultats, il apparaît que les agglomérats humides obtenus à partir des différentes farines sans gluten présentent des teneurs en eau significativement différentes ($p < 0,05$). La teneur en eau la plus élevée (49,81 %) a été notée avec les agglomérats humides issus de la farine de maïs et les plus faibles avec ceux issus des farines de sarrasin et de quinoa qui sont respectivement 35,52 et 34,32 %. Cette différence en terme de teneur en eau peut être reliée à la taille des particules natives des farines (d_{50}), les farines qui présentant un d_{50} le plus élevé donnent des agglomérats humides avec des teneurs en eau les plus élevées. Selon [Murrieta-Pazos *et al.* \(2014\)](#), le coefficient de diffusion de l'eau dans une farine augmente avec l'augmentation de la taille des particules élémentaires.

Le rendement d'agglomération varie d'une farine à une autre. Le rendement le plus élevé (98,33 %) a été obtenu avec la farine de maïs, suivi par la farine d'amarante (84,84 %). Par ailleurs, l'agglomération humide de la farine de sarrasin et de quinoa donne des rendements d'agglomération intéressants, ils sont respectivement de l'ordre de 82,38 et 75,55 %.

En ce qui concerne le diamètre médian (d_{50}) des agglomérés humides, il ressort que les agglomérats produits par la farine de sarrasin sont plus gros que les autres avec un d_{50} de 1596 μm , suivi par ceux produits par la farine de quinoa et d'amarante qui ont des d_{50} de 1530 et 1549 μm respectivement. En dernière position, nous trouvons que les agglomérats obtenus avec la farine de maïs présentent un d_{50} le plus faible ($d_{50} = 1424 \mu\text{m}$). Ceci peut être relié vraisemblablement aux faibles forces de cohésion développées entre les particules de farine de maïs comme il a été montré dans la granulation dans le MTR-Caleva[®] (Figure 40). [Bellocq *et al.* \(2018a\)](#) ont rapporté que les teneurs en protéines peuvent affecter les propriétés d'hydratation. Les faibles teneurs en protéines de la farine de maïs (08,5 g/100 g m.s.) peuvent limiter la capacité de l'absorption de l'eau d'hydratation et la création des forces de cohésion entre les particules natives de la farine. Par ailleurs, les grosses particules absorbent moins l'eau d'hydratation ce qui limite la formation des pontages et la structuration des agglomérats ([Murrieta-Pazos *et al.*, 2014](#)).

Après l'agglomération humide dans le granulateur Mi-Pro[®], il s'avère qu'une fraction de farines est transformée en pâte et ceci est significativement différent ($p < 0,05$) d'une farine à une autre. La valeur la plus élevée de la fraction pâteuse a été notée avec la farine de quinoa (20,86 %), suivi par la farine de sarrasin (16,47 %) et celle d'amarante (13,32 %) tandis que

l'agglomération humide de la farine de maïs n'a pas donné de fraction pâteuse. Les densités aérée et tassée ont été déterminées pour chaque masse d'agglomérats humide obtenue. Nous pouvons noter que les densités ont été significativement différentes ($p < 0,05$) entre les agglomérats obtenus de chaque farine. Les agglomérats issus de la farine de sarrasin ont été plus denses, suivis par ceux de quinoa et de maïs et finalement par ceux produits par la farine d'amarante.

Tableau 14. Caractéristiques des agglomérats humides issus des farines sans gluten : la teneur en eau, le rendement d'agglomération, le diamètre médian et les densités aérée et tassée

	Maïs	Amarante	Sarrasin	Quinoa
Teneur en eau (g/100g m.s.)	49,81 ($\pm 0,86$) ^a	36,49 ($\pm 0,28$) ^b	35,52 ($\pm 0,87$) ^{bc}	34,32 ($\pm 0,58$) ^c
Rendement d'agglomération (%)	98,33 ($\pm 0,22$) ^a	84,84 ($\pm 1,11$) ^b	82,38 ($\pm 0,67$) ^c	75,55 ($\pm 0,56$) ^d
d ₅₀ (µm)	1424,39 ($\pm 8,79$) ^c	1549,17 ($\pm 12,60$) ^b	1596,78 ($\pm 10,96$) ^a	1530,01 ($\pm 11,52$) ^b
Fraction pâteuse (%)	0,00 ($\pm 0,00$) ^d	13,32 ($\pm 0,74$) ^c	16,47 ($\pm 0,60$) ^b	20,86 ($\pm 0,44$) ^a
Densité aérée (g/cm ³)	0,551 ($\pm 0,00$) ^b	0,484 ($\pm 0,01$) ^c	0,601 ($\pm 0,01$) ^a	0,572 ($\pm 0,01$) ^b
Densité tassée (g/cm ³)	0,615 ($\pm 0,00$) ^b	0,539 ($\pm 0,00$) ^c	0,651 ($\pm 0,01$) ^a	0,613 ($\pm 0,00$) ^b

Les valeurs en ligne ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

Les teneurs en eau des différentes fractions constituant les agglomérats humides issus de chaque farine ont été également déterminées et les résultats sont représentés dans la figure 42. Selon les résultats obtenus, il s'avère que les teneurs en eau des différentes fractions sont hautement corrélées positivement avec leur diamètre ($r = 0,951$). Ce résultat peut être comparé à ceux trouvés dans plusieurs études (Rondet *et al.*, 2010; Saad *et al.*, 2011b ; Barkouti *et al.*, 2014; Bellocq *et al.*, 2017a; Bellocq *et al.*, 2018a), indiquant l'augmentation de l'humidité des agglomérats avec leur taille.

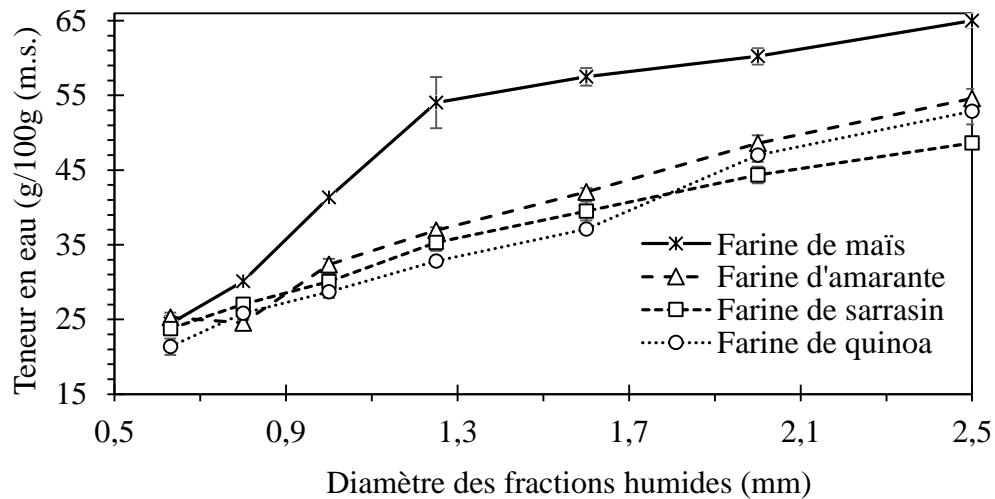


Figure 42. Teneur en eau des fractions granulométriques constituant les agglomérats humides issus de la granulation humide des farines sans gluten dans le granulateur Mi-Pro®

Les distributions de taille des agglomérats humides obtenus avec le granulateur Mi-Pro® sont représentées dans la figure 43. Il ressort que les différents agglomérats humides ont une large distribution de taille allant de 630 à 2500 μm . Seulement ceux issus de la farine de maïs ont une distribution de taille moins large avec un diamètre des agglomérats qui varie entre 800 et 2000 μm . Ceci pourrait s'expliquer par la valeur très élevée du diamètre médian ($d_{50} = 612 \mu\text{m}$) et une dispersion granulométrique faible ($DG = 1,04$) de la farine de maïs. Il a été démontré dans les résultats obtenus par [Bellocq et al. \(2018a\)](#), que la diminution du diamètre médian d'une poudre favorise l'hétérogénéité des agglomérats obtenus.

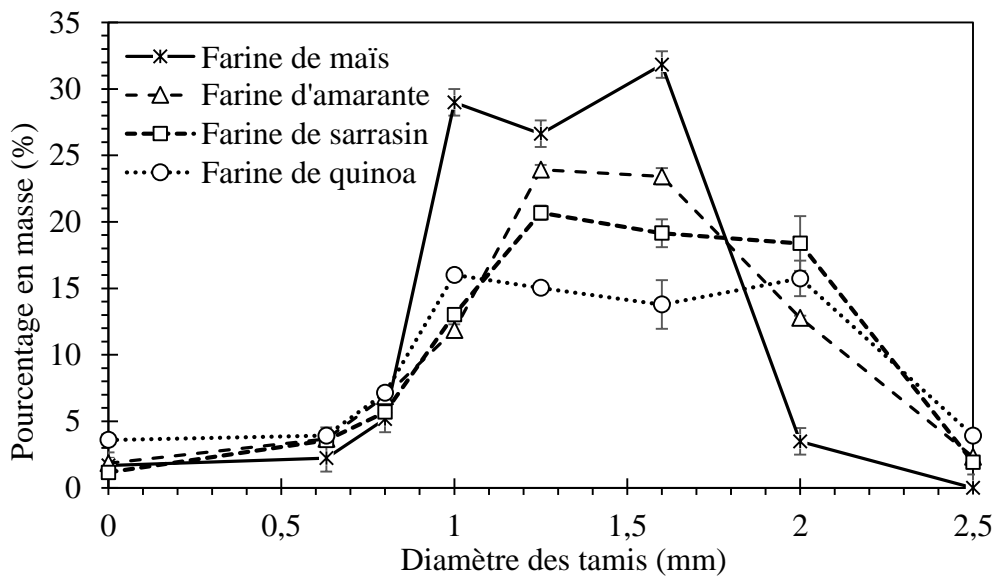


Figure 43. Distributions granulométriques des agglomérats humides issus de la granulation humide des différentes farines sans gluten dans le granulateur Mi-Pro®

II.4.7. Variabilité des agglomérats humides sans gluten

L'analyse en composantes principales (ACP) de la variabilité des agglomérats humides fabriqués à base des farines sans gluten et de la SBD (témoin) dans le granulateur Mi-Pro® est représentée dans la figure 44. Il s'avère clairement que cette ACP permet la représentation de 81,44 % de la variabilité des agglomérats humides sans gluten. La projection des variables sur un plan un deux dimension est représentée par le cercles des corrélations (Figure 44-A). Ce plan à deux dimensions est constitué des deux premiers facteurs ; F1 (44,27 %) et F2 (37,17 %). Le premier facteur est positivement corrélé avec le teneur en cendres, les densités aérée et tassée, le ratio de densification, l'écoulement massique et le diamètre médian des farines. Des corrélations négatives sont également notées avec le premier facteur notamment, la porosité, les indices de Carr et d'Hausner et la dispersion granulométrique. Par ailleurs, le deuxième facteur est positivement corrélé avec les teneurs en protéines et en fibres, le rendement d'agglomération, la teneur en eau, le d_{50} , les densités aérée et tassée des farines (Annexe 9). A travers la matrice des corrélations (Annexe10), plusieurs corrélations peuvent être soulevées. Nous pouvons citer les corrélations significativement positives entre la teneur en protéines de la poudre amylicée et la teneur en eau ($P < 0,0001$; $r = 0,73$), le d_{50} ($P < 0,0001$; $r = 0,89$), la densité aérée ($P < 0,0001$; $r = 0,85$) et la densité tassée ($P < 0,0001$; $r = 0,84$) des agglomérats humides, le rendement d'agglomération ($P < 0,0001$; $r = 0,81$) et le taux de la fraction pâteuse ($P < 0,0001$; $r = 0,74$). De plus, des corrélations significativement négatives sont également constatées entre la teneur en amidon de la poudre amylicée et la teneur en eau ($P < 0,0001$; $r = - 0,73$), le rendement d'agglomération ($P < 0,0001$; $r = - 0,79$), le d_{50} ($P < 0,0001$; $r = - 0,85$), le taux de la fraction pâteuse ($P < 0,0001$; $r = - 0,71$), les densités aérée ($P < 0,0001$; $r = - 0,81$) et tassée ($P < 0,0001$; $r = - 0,81$) des agglomérats humides. Par ailleurs, d'autres corrélations sont significativement positives notamment entre le ratio d'hydratation et l'écoulement massique ($P < 0,0001$; $r = 0,90$) et le d_{50} ($P < 0,0001$; $r = 0,75$) et entre le couple de torsion et la dispersion granulométrique ($P < 0,0001$; $r = 0,92$). D'autres sont significativement négatives entre autre, entre le ratio d'hydratation et l'angle de talus ($P < 0,0001$; $r = - 0,84$) et entre le couple de torsion et la teneur en eau ($P < 0,0001$; $r = - 0,73$) des poudres amylicées.

La figure 44-B représente le biplot qui est obtenus par la superposition du plan des individus avec celui des variables. A l'aide de cette représentation, la variabilité des différents agglomérats humides peut être analysée et trois groupes différents sont distingués. Le premier groupe concerne seulement les agglomérats humides de la farine de manioc qui présente une

teneur en amidon et une densité vraie les plus élevées. Ce groupe n'est associé à aucun des paramètres caractérisant les agglomérats humides et cela à cause de l'impossibilité d'agglomération de la farine de manioc dans le granulateurs Mi-Pro[®]. Le deuxième groupe comprend les agglomérats humides de quinoa, de sarrasin et d'amarante. Ce groupe est beaucoup plus associé à la grosseur des tailles des agglomérats, à des structures plus denses et à des taux de fractions pâteuses très élevés. Le troisième groupe représente les agglomérats humides fabriqués avec de la farine de maïs. Ces derniers sont ceux qui se rapprochent le plus aux agglomérats humides témoins (fabriqués avec de la SBD) et cela du fait qu'ils sont dans le même groupe. Ce dernier groupe est caractérisé par les rendements d'agglomération les plus élevés, les taux de fractions pâteuses les plus faibles et des structures moins denses.

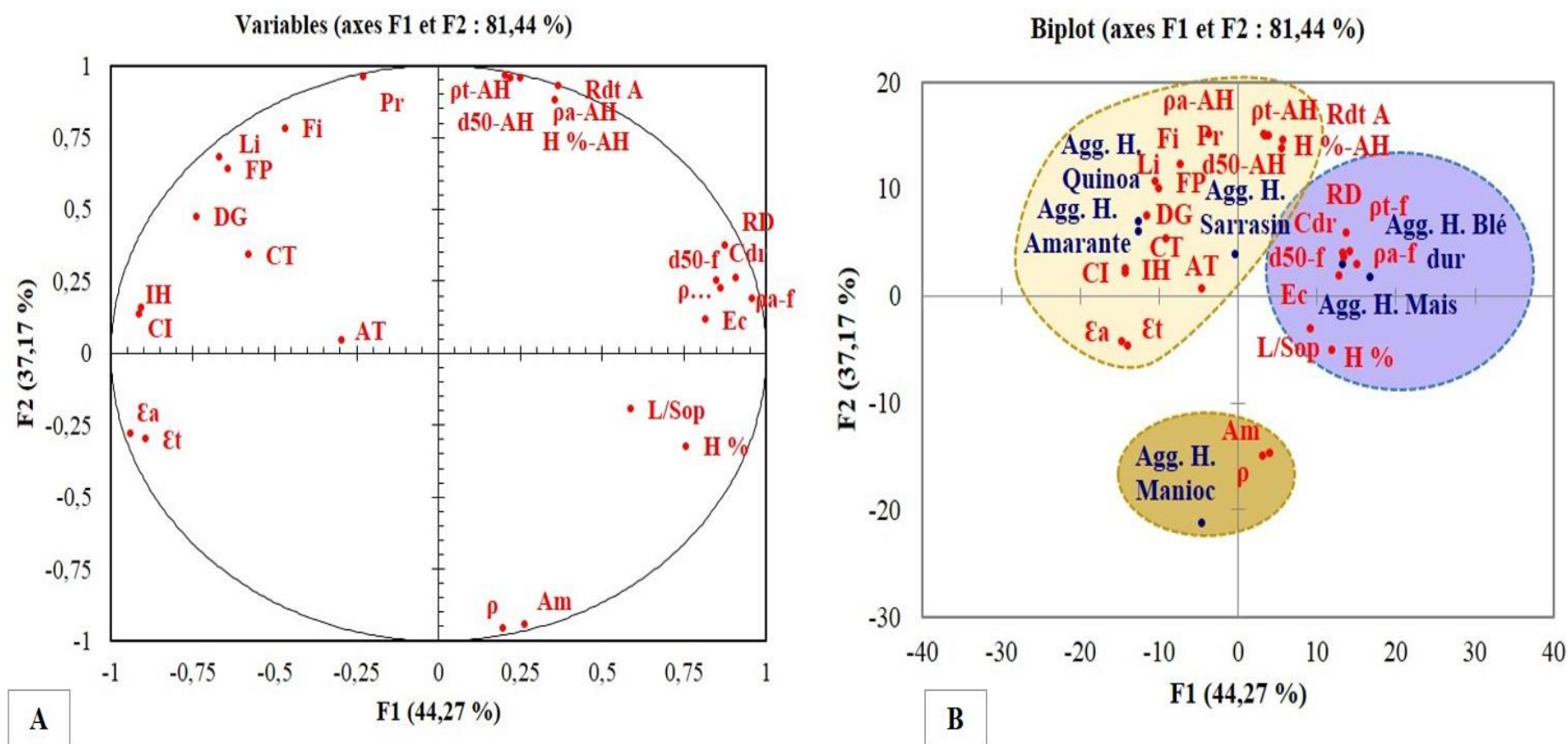


Figure 44. Analyse en composantes principales de la variabilité des agglomérats humides sans gluten. (A) Projection des variables sur le cercle des corrélations et (B) représentation des individus et de leurs caractéristiques. Abréviations : Composition biochimique (Pr : protéines, Am : amidon, Li : lipides, Fi : fibre), propriétés d'hydratation (L/Sop : ratio d'hydratation optimal, CT : couple de torsion), caractéristiques des agglomérats humides (Rdt A : rendement d'agglomération, H %-AH : teneur en eau, d_{50} -AH : diamètre médian, ρ -AH : densité aérée, ρ -AH : densité tassée, FP : fraction pâteuse)

4.8. Propriétés des couscous secs sans gluten obtenus à l'échelle artisanale

Les essais de granulation dans les deux granulateurs MTR-Caleva® et Mi-Pro® ont montré que les farines sans gluten (maïs, amarante, sarrasin et quinoa) peuvent être granulées par voie humide en agglomérats pouvant correspondre aux grains de couscous. Dans cette section, la granulabilité de ces farines a été testée par la voie artisanale et les différentes caractéristiques des couscous obtenus sont présentées.

4.8.1. Propriétés physiques

L'agglomération humide des farines sans gluten a été conduite suivant le mode artisanal et a permis l'obtention des grains de couscous (Figure 45).



Figure 45. Photographies des couscous sans gluten et du témoin (blé dur)

Le tableau 15 regroupe l'ensemble des résultats décrivant les caractéristiques physiques des couscous secs obtenus. Nous remarquons que les différents couscous obtenus ont des teneurs en eau qui répondent aux recommandations du *Codex alimentarius* ([Codex Stan 202-1995](#)) qui

doivent être inférieures à 13,5 % d'une part, et qui sont du même ordre de grandeur que la teneur en eau enregistrée avec le couscous de blé dur (témoin) et qui est de 11,63 g/100 g m.s. d'une autre part. Il apparaît que le couscous de maïs présente la teneur en eau la plus élevée avec une différence significative ($p < 0,05$) par rapport aux autres couscous avec une valeur de 12,19 g/100 g m.s. Les trois autres couscous ont des teneurs en eau comparables sans enregistrer de différences significative ($p > 0,05$). Elles sont de l'ordre de 10,91 ; 10,56 et 9,80 g/100 g m.s. pour les couscous d'amarante, de sarrasin et de quinoa respectivement. Nos résultats sont semblables à ceux de [Boucheham \(2009\)](#) où il a été rapporté que des couscous fabriqués à base de farines sans gluten (riz, féverole et pois chiche) ont des humidités variant entre 9,64 et 10,33 g/100 g m.s.

Pour ce qui est du rendement d'agglomération, nous remarquons que les valeurs sont relativement faibles par rapport à celles obtenus lors de l'agglomération dans le granulateur Mi-Pro[®]. Ceci peut être du vraisemblablement à l'impact des gestes manuels adoptés lors de la fabrication artisanale, où de faibles forces de pression ont été appliquées lors du roulage à la main et le mode de l'apport de l'eau d'hydratation qui n'a pas été contrôlé. Contrairement aux conditions d'agglomération dans le granulateur Mi-Pro[®] qui assurent des forces de cisaillement importante tout en favorisant une imbrication mécanique ([Pietsch, 1997](#)) et une hydratation contrôlée ce qui permet la création des ponts entre les particules de farines et l'augmentation du rendement de granulation. L'agglomération de la farine de maïs présente le rendement le plus élevé des farines sans gluten qui est de l'ordre de 50,30 %, suivi par celui de quinoa (45,70 %), puis par celui d'amarante (42,60 %) et enfin, le rendement le plus faible de façon significative ($p < 0,05$) est noté avec la farine de sarrasin soit 35,70 %. Toutes ces valeurs se montrent significativement inférieures ($p < 0,05$) à celle obtenue avec le témoin qui est la semoule de blé dur avec laquelle le rendement obtenu est de 85,90 %. Dans la littérature, plusieurs études ont rapporté des résultats sur le rendement d'agglomération en couscous des farines sans gluten. Dans les travaux de [Benatallah et al. \(2008\)](#), il a été remarqué que le rendement d'agglomération des farines sans gluten en couscous est largement inférieurs à celui de blé dur (82,03 %) en notant des rendements variant entre 40,71 et 67,28 % avec des formulation de farines de riz, de féverole et de pois chiches. Dans les travaux de [Boucheham \(2009\)](#), nous pouvons également noter des faibles rendements d'agglomération des farines sans gluten en couscous et les valeurs rapportées sont de l'ordre de 37 et 44 %.

Les résultats portant sur la granulométrie montrent que tous les couscous secs obtenus présentent des tailles de particules correspondant à la granulométrie du couscous. Il s'est bien

montré que le couscous de maïs a la granulométrie la plus faible avec un diamètre médiane d_{50} de 914,57 μm . Par contre, la granulométrie la plus élevée de façon très significative ($p < 0,05$) a été enregistrée avec le couscous de sarrasin et son d_{50} est de 1189,96 μm . Pour les deux autres couscous d'amarante et de quinoa, leurs d_{50} sont comparables à celui du couscous témoin de blé dur (989,46 μm) et aucune différence significative n'a été observée ($p > 0,05$). Les résultats obtenus sont 1009,68 μm pour le couscous d'amarante et 1020,34 μm pour le couscous de quinoa. [Guezlane \(1993\)](#) a rapporté qu'en plus de l'humidité initiale des matières premières, le taux d'hydratation au cours du roulage d'une semoule influence sensiblement la taille des grains de couscous obtenus et ce en favorisant les forces de liaison en terme de ponts liquides mobiles et non mobiles entre les particules de semoule ([Pietsch, 1997](#)). La finesse des particules élémentaires des farines et semoules joue également un rôle très important dans l'accroissement de la taille des agglomérats du couscous ; les fines particules donnent des couscous plus gros. Les fines particules présentent des réactivités très élevées avec l'eau d'hydratation, elles absorbent plus rapidement et interagissent facilement sous l'effet du roulage pour donner des agglomérats plus gros.

Les analyses densimétriques ont montré que les couscous secs sans gluten ont des densités aérées significativement différentes ($p < 0,05$) tout en présentant une différence significative ($p < 0,05$) par rapport au couscous témoin. Il apparaît que les couscous de sarrasin et de quinoa sont les plus denses et les plus compacts avec des densités aérées respectives de 0,663 et 0,650 g/cm^3 . Par ailleurs, les couscous de maïs et d'amarante sont significativement moins denses ($p < 0,05$) pour lesquels les valeurs enregistrées sont de 0,638 et 0,634 g/cm^3 respectivement. Ce résultat peut s'expliquer par les espaces inter-granulaires que présentent les différents couscous. En examinant les résultats relatifs à la densité tassée, nous pouvons clairement noter que les couscous de maïs et d'amarante ont des aptitudes au tassement plus élevées que celles des couscous de sarrasin et de quinoa. Ceci peut être lié aux espaces inter-granulaires qui sont plus abondants avec les couscous de maïs et d'amarante. La caractérisation physique des couscous secs a été complétée par la détermination de l'aptitude au tassement de la poudre et les frottements entre particules lors de l'écoulement de la poudre sont caractérisés par les indices d'Haussner (IH) et de Carr (IC). Les résultats obtenus montrent que tous les couscous présentent un excellent écoulement.

Tableau 15. Caractéristiques physiques des couscous secs sans gluten obtenus par le procédé artisanal

Couscous	Maïs	Amarante	Sarrasin	Quinoa	Blé dur (témoin)
Teneur en eau (g/100g m.s.)	12,19 (\pm 0,71) ^a	10,91 (\pm 0,85) ^{abc}	10,56 (\pm 0,42) ^{bc}	9,80 (\pm 0,30) ^c	11,63 (\pm 0,51) ^{ab}
Rendement d'agglomération (%)	50,30 (\pm 2,61) ^b	42,60 (\pm 2,16) ^{cd}	35,70 (\pm 1,47) ^d	45,70 (\pm 2,87) ^{bc}	85,90 (\pm 3,47) ^a
d ₅₀ (μ m)	914,57 (\pm 14,17) ^c	1009,68 (\pm 14,78) ^b	1189,96 (\pm 19,76) ^a	1020,34 (\pm 20,87) ^b	989,46 (\pm 18,11) ^b
Densité aérée (g/cm ³)	0,638 (\pm 0,01) ^{ab}	0,634 (\pm 0,01) ^{ab}	0,663 (\pm 0,01) ^a	0,650 (\pm 0,01) ^a	0,619 (\pm 0,01) ^b
Densité tassée (g/cm ³)	0,73 (\pm 0,01) ^{ab}	0,72 (\pm 0,02) ^{ab}	0,74 (\pm 0,01) ^a	0,72 (\pm 0,01) ^{ab}	0,69 (\pm 0,01) ^b
Indice d'Hausner	1,14 (\pm 0,01) ^a	1,13 (\pm 0,02) ^a	1,12 (\pm 0,01) ^a	1,11 (\pm 0,00) ^a	1,12 (\pm 0,03) ^a
Indice de Carr	12,21 (\pm 0,62) ^a	11,57 (\pm 1,63) ^a	10,85 (\pm 0,74) ^a	10,27 (\pm 0,36) ^a	10,90 (\pm 2,25) ^a

Les valeurs en ligne ayant la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > 0,05$).

4.8.2. Propriétés culinaires

4.8.2.1. Indice de gonflement

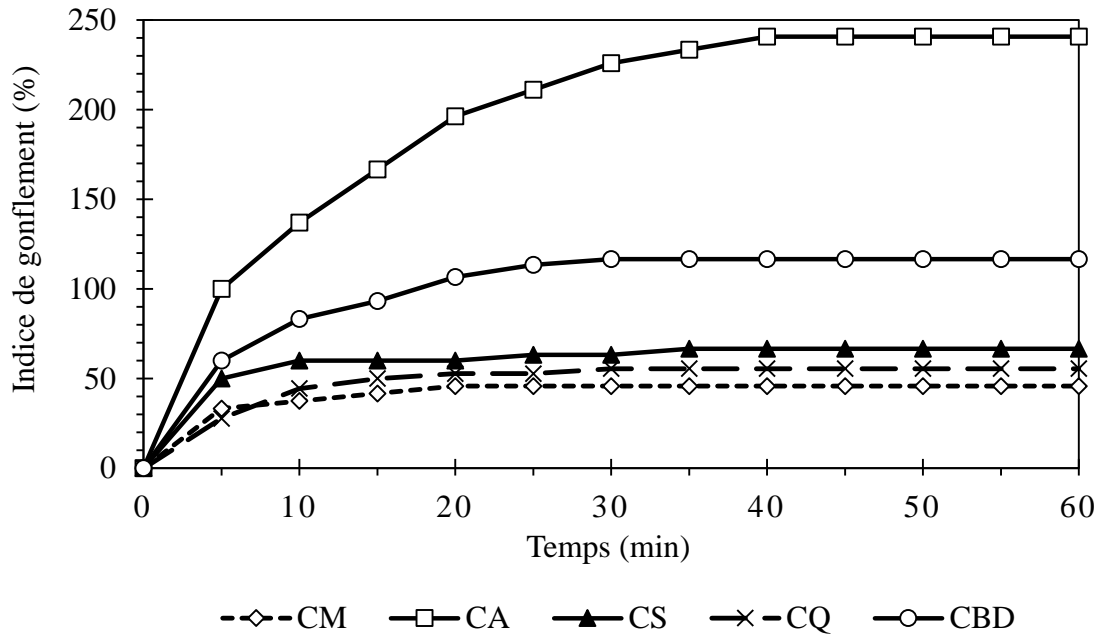
Pour sa consommation, le couscous est généralement servi avec de la sauce ou avec du lait (*l'ben*). Selon [Debbouz et Donnelly \(1996\)](#), le gonflement rapide d'un couscous mis en contact d'un liquide témoigne de sa bonne qualité. Les courbes de l'évolution des indices de gonflement dans l'eau à des températures de 25 et 95 °C sont représentées dans la figure 46. Nous pouvons remarquer que les indices de gonflement des couscous analysés à 25 et 95 °C suivent la même allure. Dès le trempage du couscous dans l'eau, l'indice de gonflement augmente rapidement durant les 20 premières minutes. Au-delà de cette période, la vitesse de l'augmentation de l'indice de gonflement s'atténue progressivement jusqu'à 60 minutes. Ces observations concordent avec ceux de la littérature ([Guezlane et al., 1986](#); [Yousfi, 2002](#) ; [Benatallah et al., 2008](#); [Boucheham, 2009](#); [Mezroua, 2011](#); [Doukani, 2015](#)). A la température de 25 °C et avec les couscous de maïs, de sarrasin et de quinoa, la stabilisation de l'IG est notée après la 10^{ème} minute et les valeurs atteintes sont de l'ordre de 45,83 ; 55,55 et 60,66 % respectivement. Ces valeurs sont clairement inférieures par rapport à celle obtenue avec le couscous témoin de blé dur qui présente un IG de 116,67 %. Pendant ce temps, il est à souligner que le couscous d'amarante gonfle lentement et ne se stabilise qu'après la 40^{ème} minute et l'IG atteint une valeur de 240,74 % qui est significativement très élevée ($p < 0,05$) par rapport aux autres couscous sans gluten et au couscous témoin. Dans les conditions de températures plus élevée (95 °C), les IG atteints ont connu des augmentations très remarquables avec tous les couscous analysés. L'IG le plus élevé est toujours noté avec le couscous d'amarante avec une valeur de 270 %. Pour les autres couscous sans gluten, les valeurs affichées varient entre 98 % pour le couscous de maïs, 113 % pour le couscous de quinoa et 125 % pour le couscous de sarrasin. Ces trois dernières valeurs de l'IG restent toujours inférieures par rapport à celle obtenue pour le couscous témoin de blé dur (182 %).

Le fait que le couscous de blé dur présente un IG plus important que ceux du maïs, de sarrasin et de quinoa peut être expliqué par plusieurs facteurs, en principe par l'absence du gluten dans ces derniers. [Debbouz et al. \(1994\)](#) ont rapporté que les teneurs en gluten dans le couscous pourraient influencer le comportement du gonflement. Ces auteurs ont noté que les couscous artisanaux issus des semoules de blé dur à gluten fort présentaient un IG plus important que ceux fabriqués avec des semoules de blé dur à gluten faible. En plus du gluten, il a été rapporté que l'amidon représente un élément pouvant largement influencer l'aptitude au gonflement qui dépend de l'espèce botanique et du type cristallin de l'amidon natif ([Singh et al., 2006](#) ;

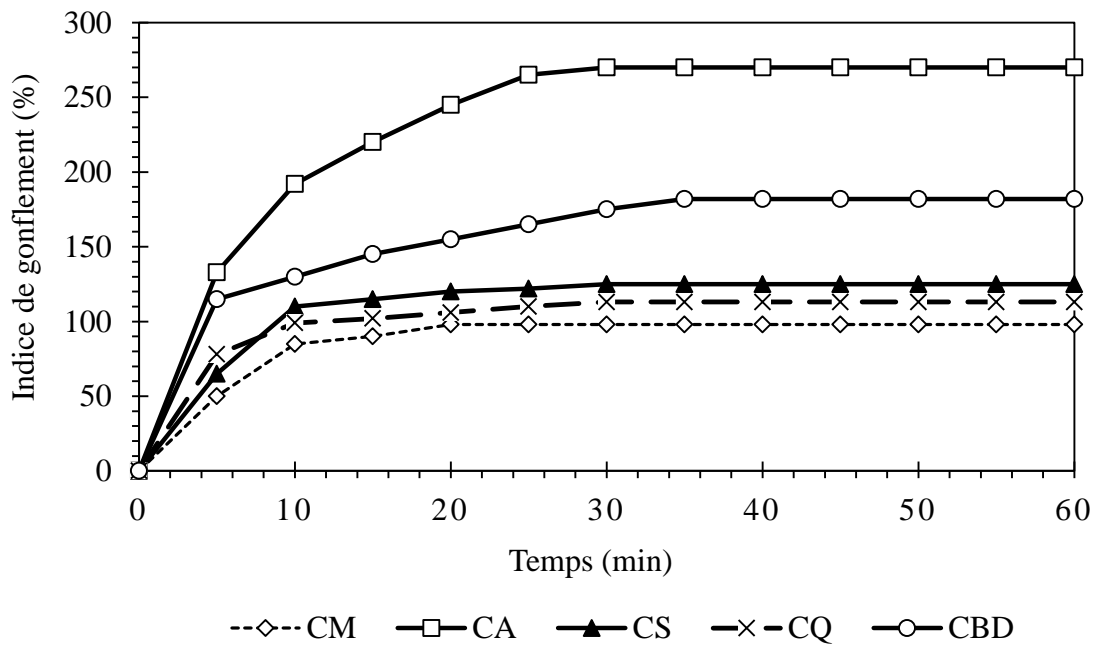
Chemache, 2011). Il a été rapporté par Sasaki et Matsuki (1998) et Vansteelandt et Delcour (1999) que les proportions en amylose sont hautement corrélées avec la force de gonflement. Dans d'autres travaux, il est indiqué que l'amylopectine est la fraction responsable du gonflement des grains d'amidon et l'augmentation de ces teneurs favorise la formation d'une structure micellaire très liée (Tester et Morrison, 1990; Kiribuchi-Otobe *et al.*, 1997; Yamamori et Quynh, 2000 ; Baik et Lee, 2003; Yamamori, 2009). Par ailleurs, il est à noter qu'Idir (2000) a lié l'indice de gonflement à la finesse des semoules utilisées pour la fabrication du couscous en soulignant que les couscous issus de semoules fines gonflent moins. Par contre, ce constat peut être contrarié par ce que Murrieta-Pazos *et al.* (2014) ont rapporté en disant que les semoules fines absorbent, gonflent et prennent plus de volume grâce l'abondance de l'amidon endommagé qui a une capacité de rétention de l'eau cinq fois plus que l'amidon natif (Aymard, 2010).

Pour le gonflement du couscous préparé à base de la farine d'amarante, il ressort clairement qu'il présente un IG significativement élevé ($p < 0,05$) par rapport aux autres couscous sans gluten et même le couscous de blé dur. Ce résultat a été noté dans les deux conditions de température ; son IG a affiché 240,74 et 270 % à 25 et 95 °C respectivement. Ce résultat peut être expliqué par la composition biochimique de la farine d'amarante. Cette dernière renferme des teneurs très élevées en fibres (9,50 g/100 g m.s.) et en protéines (15,50 g/100 g m.s.) par rapport aux autres farines et la semoule. Il a été indiqué par (Aymard, 2010) que les fibres ne sont pas pour autant inertes à l'eau et gonflent de manière significative en présence d'eau.

Indépendamment des teneurs en protéines, amidon, fibres et lipides, il est fort probable que la qualité de ces principaux composants biochimiques joue pour une large part un rôle dans le phénomène de gonflement dans l'eau dans la mesure où la structure des grains de couscous (porosité) et leurs caractéristiques physiques (densités aérée et tassée et taille et granulométrie) ne montrent pas de différences par rapport aux couscous de maïs, de sarrasin, de quinoa et de semoule de blé dur.



(a)



(b)

Figure 46. Evolution des indices de gonflement dans l'eau à 25 °C (a) et à 95 °C (b) des couscous fabriqués en fonction du temps. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur

4.8.2.2. Degré de délitescence

Il a été constaté précédemment que les grains des couscous gonflent en présence de l'eau. Dans le cas où ces particules sont soumises à une cuisson et/ou agitation, une éventuelle désintégration pourra avoir lieu. Pour cette raison, le degré de délitescence qui a été considéré comme indice de qualité (Guezlane, 1993; Yettou, 1998 ; Ounane *et al.*, 2006) est évalué et les résultats sont représentés dans la figure 47.

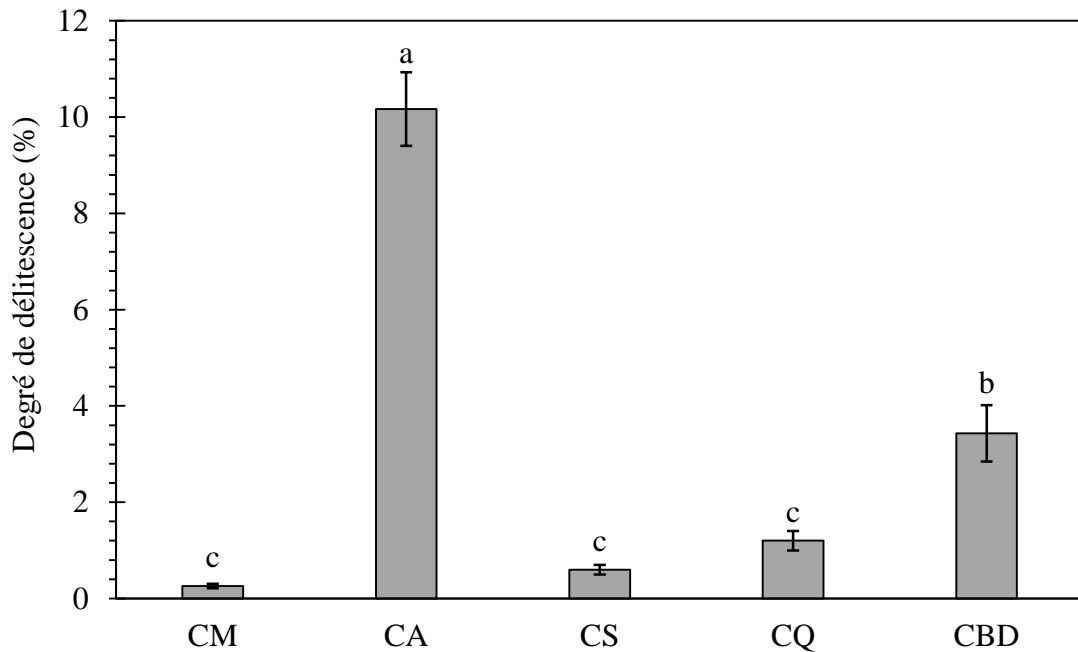


Figure 47. Degré de délitescence des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)

Il ressort clairement que les couscous sans gluten à base de maïs (0,26 %), de sarrasin (0,60 %) et de quinoa (1,20 %) ont des degrés de délitescence significativement inférieurs ($p < 0,05$) à celui noté avec le couscous de blé dur (3,43 %). Ce résultat peut être expliqué par les caractéristiques des matières premières ; la finesse des particules natives des farines de sarrasin et de quinoa pourrait être derrière la production d'agglomérats plus compacts suite à l'abondance de l'amidon endommagé qui favorise la formation de gel visqueux qui joue le rôle d'un pont solide entre les nucléi (Galiba *et al.*, 1988; Mohamad Saad *et al.*, 2009; Murrieta-Pazos *et al.*, 2014). De plus, Rumpf (1962) a rapporté que la résistance des agglomérats est inversement proportionnelle aux diamètres des particules primaires ; plus la granulométrie de ces dernières est grande et monodisperse, plus les agglomérats formés sont fragiles et

déformables. Le constat de cet auteur semble être valable avec nos couscous de sarrasin et de quinoa mais non avec le couscous de maïs. Malgré la grosseur et la monodispersion de la farine de maïs, le DD présenté par son couscous est trop faible. Ceci résulte de la grosseur des particules natives qui présentent un d_{90} de 1010 μm qui dépasse le diamètre du tamis utilisé pour la filtration du surnageant pendant l'analyse.

Cependant, le couscous d'amarante présente un DD de 10,17 % qui est significativement supérieur ($p < 0,05$) à ceux enregistrés avec les trois autres couscous sans gluten et le couscous témoin. D'après ces résultats, il apparaît clairement que les couscous d'amarante et de blé dur qui gonflent plus (Figure 46) sont également eux qui présentent des degrés de délitescence les plus élevés. Ces deux paramètres (gonflement et DD) laissent penser que le produit qui gonfle beaucoup acquiert une structure fragile qui favorise sa désintégration.

4.8.2.3. Temps de cuisson

Le temps de cuisson est un facteur très important pour la définition de la qualité des pâtes alimentaires et du couscous (Yousfi, 2002). Les temps de cuisson déterminés sont le temps minimal, le temps optimal et le temps de surcuisson. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 48.

Le temps de cuisson minimal qui correspond au temps de la première cuisson est significativement différent ($p < 0,05$) d'un couscous à l'autre. Nous pouvons remarquer que le couscous maïs présente le temps minimal le plus élevé qui est de 21 min. Ensuite, le couscous de sarrasin se montre avec un temps minimal de cuisson du même ordre que celui du couscous de maïs avec 19 min. Par ailleurs, les valeurs enregistrées pour le couscous de quinoa sont de l'ordre de 17 min et enfin, il a été constaté que les premières vapeurs commencent à apparaître à la surface juste après la 6^{ème} minute avec le couscous d'amarante qui présente le temps minimal de cuisson le plus court.

Pour le temps de cuisson optimal, des différences significatives ($p < 0,05$) ont été soulevées entre le couscous de maïs, d'amarante et de sarrasin d'une part et les couscous de quinoa et de blé dur d'une autre part. Pour une cuisson optimale, le couscous de maïs doit être cuit durant une durée estimée à 43 min, alors que ceux de sarrasin et de quinoa nécessitent 32 et 25 min respectivement. Pour le couscous d'amarante, il semble qu'un temps de 9 min soit suffisant pour une cuisson optimale.

Au-delà de la cuisson optimale, les grains de couscous absorbent davantage la vapeur d'eau et s'exposent de plus en plus aux températures élevées. Par la suite, des modifications texturales

des surfaces externes des grains commencent à s'installer et l'aspect général est modifié en donnant présence au caractère collant et la formation des mottes et fractions pâteuses. A ce stade on parle de la sur-cuisson. A ce propos, les résultats obtenus montrent que le couscous de maïs résiste plus à la cuisson, et la formation de mottes est observée après 76 min de cuisson. Cette valeur se voit significativement supérieure ($p < 0,05$) à celle notée avec le couscous de blé dur (témoin) qui est de 61 min. La résistance à la cuisson est également très élevée avec les couscous de sarrasin et de quinoa qui présentent des temps de sur-cuisson respectifs de 66 et 60 min. Par contre, le couscous d'amarante présente une exception et commence à coller plus tôt, il affiche un temps de sur-cuisson de 13 min qui représente la valeur la plus faible.

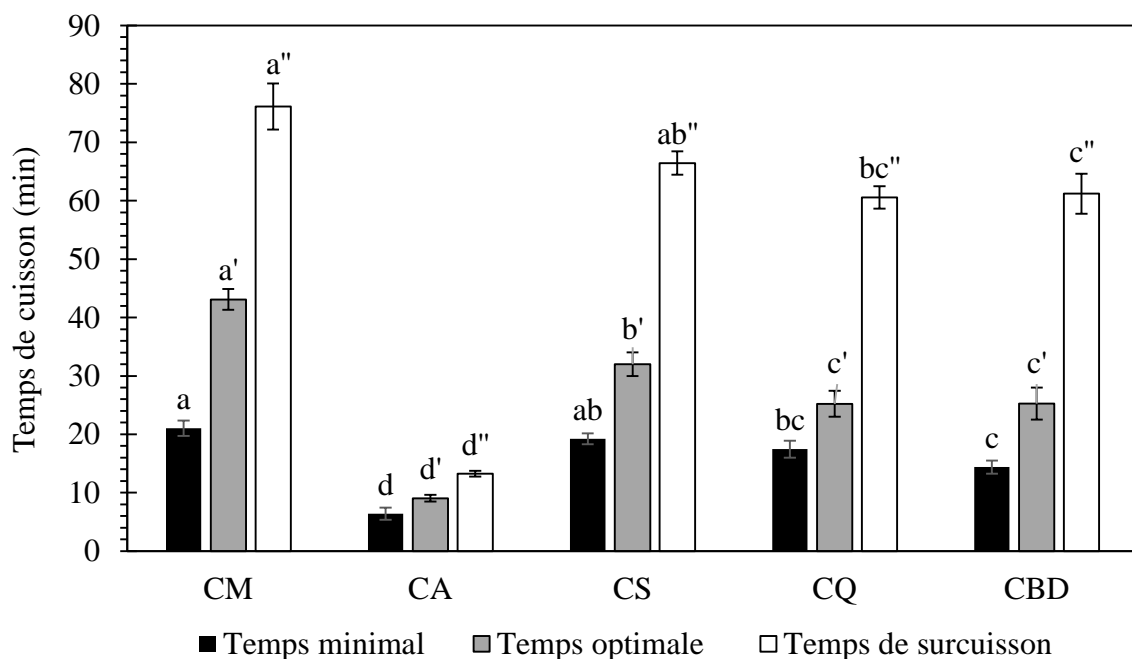


Figure 48. Temps de cuisson des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)

4.8.2.4. Indices de gain en masse et en volume

Pendant la cuisson du couscous à la vapeur d'eau, en plus du temps de cuisson, l'étude de la qualité culinaire est complétée par la détermination du gain en masse et du gain en volume et les résultats obtenus sont mentionnés dans la figure 49. Nous remarquons que les couscous issus de farines sans gluten en particulier le couscous de maïs et de sarrasin présentent des IGM et IGV significativement supérieurs ($p < 0,05$) à ceux noté avec le couscous témoin de blé dur qui sont de l'ordre de 122,67 % pour le gain en masse et 121,17 % pour le gain en volume. Ce résultat montre que le couscous de maïs et de sarrasin absorbent des volumes importants de

vapeur d'eau ce qui donne des IGM et IGTV très intéressants témoignant de la bonne qualité culinaire de ces deux couscous. Par ailleurs, des IGM et IGTV significativement inférieurs ($p < 0,05$) à ceux du couscous de blé dur sont enregistrés avec les couscous fabriqués avec les farines d'amarante et de quinoa. Les valeurs des IGM et IGTV ont atteint 96 et 86 % respectivement pour le couscous de quinoa et 29 et 40 % pour le couscous d'amarante comme étant les valeurs les plus faibles. Selon la littérature (Sabanis *et al.*, 2006 ; Demir *et al.*, 2010), la variabilité de gain en masse et en volume est généralement liée aux teneurs de l'amidon dans les semoules et farines, mais également aux propriétés de gélatinisation de cet amidon. Par ailleurs, Debbouz *et al.* (1994) et Idir (2000) ont rapporté que les couscous issus des semoules fines présentent des indices de gain en masse et en volume plus importants que ceux fabriqués avec des semoules grosses et intermédiaires. Le même constat a été mentionné dans les travaux de Sabanis *et al.* (2006) menés sur les pâtes alimentaires (nouilles) et ceux de Dexter *et al.* (1994) sur les produits de panification.

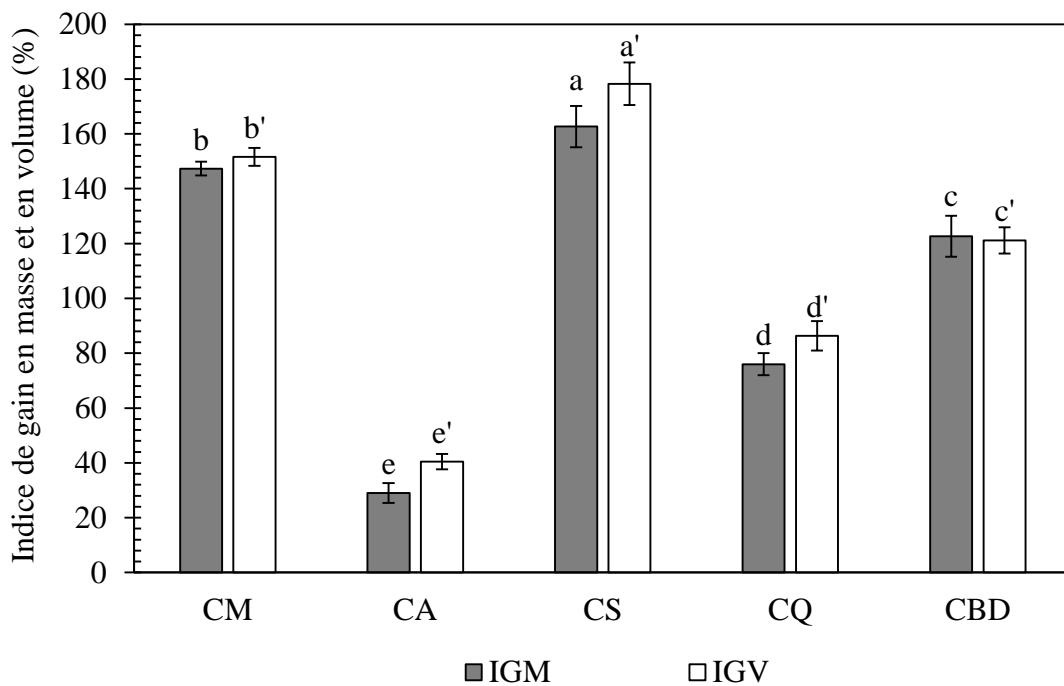


Figure 49. Indices de gain en masse et en volume des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)

4.8.3. Propriétés sensorielles

La qualité sensorielle des couscous sans gluten et du témoin a été évaluée à travers deux tests ; le test de classement par rang et le test hédonique.

Pour le test de classement par rang, il a été demandé aux dégustateurs de classer les échantillons selon l'acceptabilité générale sans donner d'égalité. Les totaux des cotes de classement ainsi que le classement final sont consignés dans le tableau 16.

Tableau 16. Résultats du test de classement par rang des couscous fabriqués. *CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)*

	CM	CA	CS	CQ	CBD
Total de classement	50	125	85	90	25
Classement	2	5	3	4	1

Les différences entre les totaux de classement par paires étaient les suivantes :

CM-CA	75
CM-CS	35
CM-CQ	40
CM-CBD	25
CA-CS	40
CA-CQ	35
CA-CBD	100
CS-CQ	5
CS-CBD	60
CQ-CBD	65

La valeur critique au seuil de signification de 0,01 lue sur la table (Annexe 3) pour 24 dégustateurs et 5 échantillons est de 30. Les différences entre les totaux de classement par paires montrent que tous les couscous sont significativement différents (différences > 30). Par contre, il est à noter que le couscous de sarrasin (CS) et celui du quinoa (CQ) ne sont pas significativement différents car la différence est inférieure à 30. La même chose peut être remarquée entre le couscous de maïs (CM) et le couscous de blé dur (CBD) où la différence est inférieure à 30. Selon l'acceptabilité générale, nous trouvons que le couscous témoin est classé

au premier rang, suivi par le couscous de maïs, ensuite le couscous du sarrasin et du quinoa et enfin, le couscous d'amarante se voit en dernier rang.

A travers les profils sensoriels représentés dans la figure 50, il apparaît clairement que l'échantillon qui se rapproche le plus du couscous de blé dur est le couscous fabriqué avec la farine de maïs. Les deux profils comparables de CM et CBD confirment l'absence de différence significative notée dans le test précédent du classement par rang. Pour les couscous de sarrasin et de quinoa, ils présentent des profils similaires avec notation d'une couleur plus sombre (brune) pour le couscous de sarrasin pour laquelle la note attribuée est de 8/10 comme étant la plus élevée. Par ailleurs, le couscous d'amarante se distingue par un profil sensoriel différent des autres. Ce dernier se voit avec un attribut collant très intense avec un score de 8,7/10 qui est significativement très élevé ($p < 0,05$). Les particules constituant le couscous d'amarante collent les unes aux autres malgré le respect du temps optimal de cuisson qui est remarquablement très court (9 min). Le test hédonique a également révélé que le couscous d'amarante présente la fermeté la plus faible par rapport aux autres couscous ; la texture de ses grains semble être élastique et la force nécessaire pour écraser l'équivalent d'une petite cuillère de couscous avec les molaires doit être importante. Pour l'appréciation globale, nous pouvons remarquer qu'à l'exception du couscous d'amarante, tous les couscous sans gluten ont obtenu des notes supérieures ou égales à la moyenne et qui peuvent être considérées comme acceptables. Les notes attribuées pour chaque couscous sont 3,50 pour le couscous d'amarante, 5,00 pour le couscous de sarrasin, 5,50 pour le couscous de quinoa et 6,50 pour le couscous de maïs. Toutes les notes attribuées aux couscous sans gluten sont significativement inférieures ($p < 0,05$) à celle du couscous de blé dur qui est de 9,00.

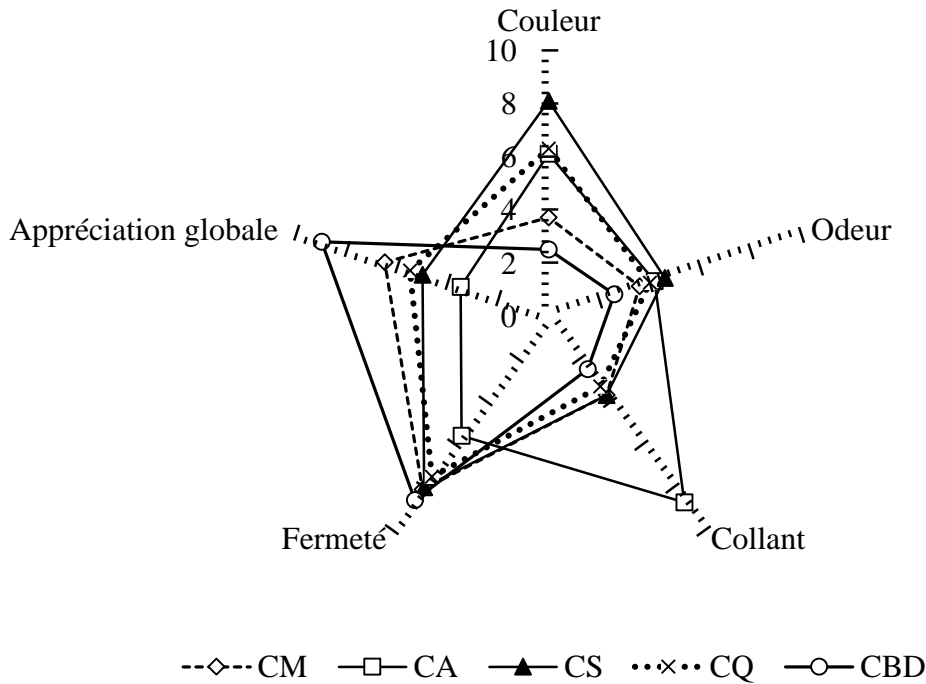


Figure 50. Profils sensoriels des couscous fabriqués. CM : couscous de maïs, CA : couscous d'amarante, CS : couscous de sarrasin, CQ : couscous de quinoa et CBD : couscous de blé dur (témoin)

4.8.4. Variabilité des couscous secs sans gluten

Après avoir déterminé les propriétés physiques, culinaires et sensorielles des couscous sans gluten, leur variabilité a été étudiée par analyse en composantes principales (ACP). Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 51. Il s'avère que cette ACP explique 79,29 % de la variabilité entre les différents couscous secs fabriqués avec les farines sans gluten. Les variables caractérisant chaque individu sont projetés sur un plan à deux dimensions et le cercle des corrélations est donné dans la figure 51-A. Ce plan est constitué des deux premiers facteurs ; F1 et F2 qui expliquent respectivement 45,88 et 33,41 % de la variabilité. Le facteur F1 est positivement corrélé avec la plus part des paramètres caractérisant les couscous sec, à savoir la teneur en eau, le rendement d'agglomération en couscous, le d_{50} , les densités aérée et tassée, les propriétés d'écoulement, les temps de cuisson, les indices de gain en masse et en volume, l'odeur, la fermeté et l'appréciation globale. Le facteur F2 est également corrélé positivement avec le gonflement, le degré de délitescence, la couleur et le collant (Annexe 11).

Le cercle des corrélations permet la visualisation des corrélations entre les variables qui caractérisent les différentes farines et celles des couscous sec. Nous pouvons noter des corrélations significativement positives entre la teneur en protéines des farines et certaines

caractéristiques des couscous secs comme la teneur en eau ($r = 0,83$), le d50 ($r = 0,91$), les densités aérée et tassée ($r = 0,90$), l'IC ($r = 0,87$), l'IH ($r = 0,89$), le gonflement à 25°C ($r = 0,75$) et à 95°C ($r = 0,87$), la couleur ($r = 0,82$), l'odeur ($r = 0,90$) et le collant ($r = 0,82$). Pour la teneur en amidon des farines, il apparaît qu'elle est négativement corrélée avec la teneur en eau ($r = - 0,81$), le d50 ($r = - 0,88$), les densités aérée et tassée ($r = - 0,88$), les propriétés d'écoulement ($r = - 0,87$), le gonflement à 25°C ($r = - 0,78$) et à 95°C ($r = - 0,89$), la couleur ($r = - 0,80$), l'odeur ($r = - 0,89$) et le collant ($r = - 0,87$). Les teneurs en lipides dans les farines sont positivement corrélées avec l'aspect collant des couscous cuit. En ce qui concerne les fibres, il est à signaler que les fibres sont positivement corrélées avec le gonflement à 25°C ($r = 0,84$) et à 95°C ($r = 0,85$) et également avec le collant ($r = 0,94$) ce qui explique le gonflement et l'aspect collant du couscous fabriqué avec de la farine d'amarante qui est riche en fibres (9,5 g/100 g m.s.) et en lipides (7,10 g/100 g m.s.) (Annexe 12).

Pour pouvoir analyser la variabilité des couscous secs sans gluten en fonction de leurs caractéristiques, le biplot est établi par la superposition du plan des individus avec celui des variables (figure 51-B). Les différents couscous secs sans gluten sont regroupés en quatre groupes significativement différents comme le montre également la figure 51-C qui représente le dendrogramme de classification hiérarchique descendante. Le premier groupe représente théoriquement le couscous de manioc et il n'est associé à aucune caractéristique, et ceci est en raison de l'impossibilité pratique de transformation de la farine de manioc en grains de couscous. Le deuxième groupe concerne le couscous de maïs et le couscous de blé dur (témoin). Ceci laisse penser que le couscous de maïs présente des caractéristiques qui se rapprochent le plus à celles du couscous de blé dur par rapport aux autres couscous sans gluten. Ils sont associés aux bons rendements au roulage, aux indices de gain en masse et en volume très intéressants et à des temps de cuisson (temps de cuisson minimal, optimal et maximal) les plus prolongés. Le troisième groupe représente le couscous d'amarante qui est associé à des gonflements très élevés à 25°C et à 95°C et au degré de délitescence très marqué. Le quatrième et le dernier groupe rassemble le couscous de quinoa et de sarrasin. Ces derniers sont associés à des valeurs élevées en termes des rendements au roulage, de densités aérée et tassée, du diamètre médian, des indices de Carr et d'Hausner, de couleur, d'odeur et du collant.

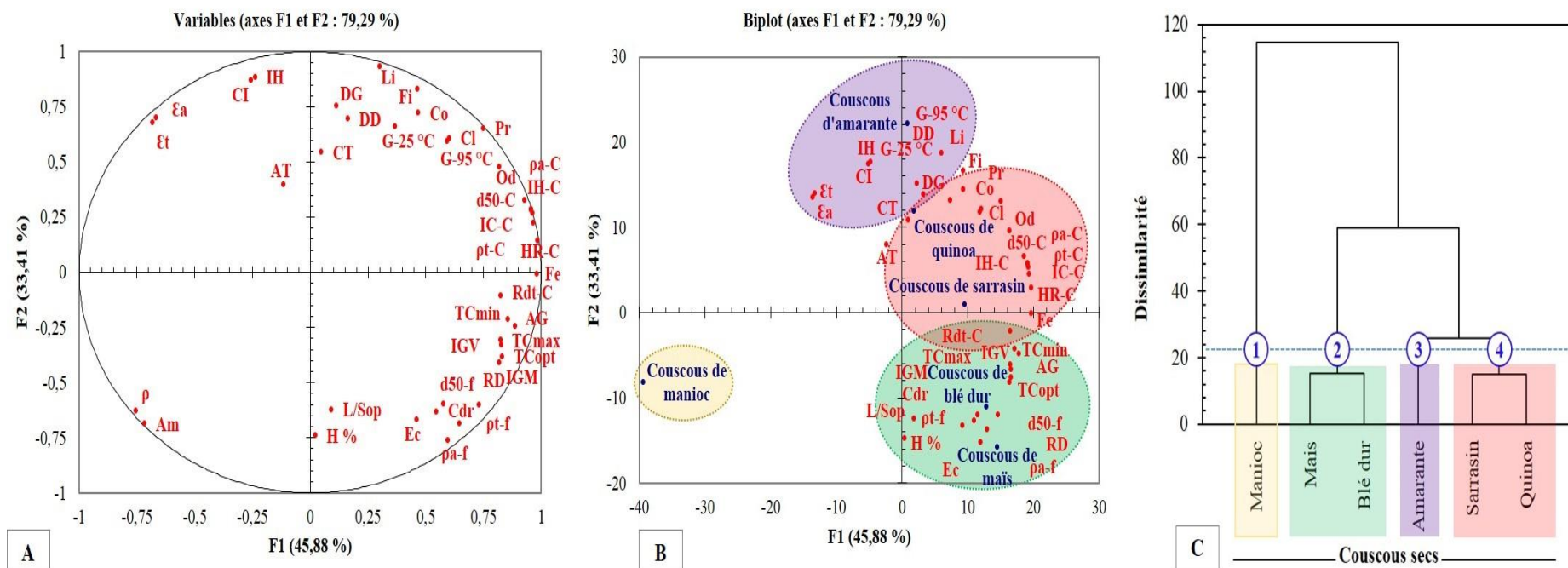


Figure 51. Analyse en composantes principales de la variabilité des couscous secs sans gluten. **A)** cercle des corrélations des paramètres caractérisant les différents couscous secs et leur matières premières. **B)** Biplot de la variabilité des couscous sans gluten. **C)** Classification hiérarchique descendante des couscous sans gluten. Abréviations : Composition biochimique (Pr : protéines, Am : amidon, Li : lipides, Fi : fibre), propriétés d'hydratation (L/Sop : ratio d'hydratation optimal, CT : couple de torsion), caractéristiques des couscous secs (HR-C : teneur en eau, Rdt-C : rendement au roulage, d₅₀-C : diamètre médian, ρ_a-C : densité aérée, ρ_t-C : densité tassée, IC-C : indice de Carr, IH-C : indice d'Hausner, G-25°C : gonflement à 25°C, G-95°C : gonflement à 95°C, DD : degré de délitescence, TCmin : temps de cuisson minimal, TCopt : temps de cuisson optimal, TCmax : temps de cuisson maximal, IGM : indice de gain en masse, IGV : indice de gain en volume, Cl : couleur, Od : odeur, Co : collant, Fe : fermeté et AG : appréciation globale)

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce projet de thèse était de fournir une analyse plus approfondie de la fabrication artisanale du couscous. Ceci a été conduit à travers une enquête sur terrain au Nord-Est de l'Algérie sur le procédé de fabrication artisanale, les méthodes de préparation et les modes de consommation. Après avoir établi un digramme détaillé de la fabrication artisanale, certaines pratiques ont été ciblées pour analyser à l'échelle laboratoire leurs impacts sur le procédé d'agglomération d'une part et sur les propriétés des agglomérats ainsi formés d'une autre part. Les pratiques en question sont l'ajout de la farine de blé dans l'étape de mise en forme des grains de couscous et l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation. De plus, ce travail visait également l'exploration de la faisabilité de la fabrication du couscous à base de farines sans gluten dans le but d'élargir la gamme des différents types des couscous.

La réalisation de l'enquête sur la fabrication, la préparation et la consommation du couscous artisanal dans la région du Nord-Est de l'Algérie nous a conduits à dresser un diagramme bien détaillé de la fabrication artisanale du couscous. A travers ce diagramme, plusieurs pratiques ont été énumérées comme opérations clefs pouvant largement influencer la qualité du couscous. Parmi ces pratiques, nous pouvons citer les plus marquantes par ordre hiérarchique : (i) la précuisson de la fraction grosse de la semoule avant son hydratation, (ii) l'utilisation de l'eau salée comme liquide d'hydratation, (iii) l'addition de la farine de blé tendre ou de l'amidon de maïs pendant l'étape de finition, (iv) le séchage combiné à l'ombre puis au soleil. De la matière première jusqu'au produit fini prêt à la consommation, différents états de couscous se sont identifiés ; le couscous humide, le couscous précuit, le couscous sec et le couscous cuit.

Les résultats relatifs à l'ajout de la farine de blé tendre lors de la granulation humide de la semoule de blé dur et de la farine d'orge ont montré que cette pratique influence largement le mécanisme de la genèse des grains du couscous et de leurs propriétés. Les forces de liaison entre les particules natives deviennent plus importantes ce qui favorise leur imbrication mécanique. De plus, la présence de fines particules riche en amidon endommagé permet une absorption plus importante de l'eau d'hydratation tout en provoquant des modifications physicochimiques profondes des composés des poudres amylicées. Tout cela facilite l'accroissement de la taille des agglomérats. Ces derniers sont devenus plus gros et plus denses ce qui leur permet de résister aux différentes forces de chocs et de garder leur intégrité même après l'hydratation et la cuisson.

Les essais sur l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation ont fait ressortir des résultats qui nous ont permis de mieux expliquer son utilisation à l'échelle artisanale. Il s'est avéré que la présence du sel (NaCl) dans l'eau d'hydratation modifie sensiblement ses propriétés réactionnelles avec la semoule agglomérée. Malgré l'augmentation du besoin de l'eau nécessaire à l'agglomération (ratio d'hydratation), les forces de cohésion développées dans le mélange se voient diminuées et cela en raison de la baisse du pouvoir mouillant de l'eau salée suite à la diminution de la tension superficielle causée par l'augmentation de l'angle de contact. De plus, nous pouvons souligner que la salinité de l'eau d'hydratation entraîne une baisse du rendement au roulage et de la taille des agglomérats. Par ailleurs, les agglomérats obtenus avec de l'eau salée sont peu compacts ce qui se traduit avec une faible densité.

Concernant les essais menés sur les farines sans gluten, nous avons pu montrer que ces dernières peuvent être transformées en grains de couscous que ce soit à l'échelle laboratoire dans un granulateur ou à l'échelle artisanale fait maison. Par contre, la farine de manioc ne s'agglomère pas et ne donne pas de grains pouvant être comparés à ceux du couscous. Néanmoins, certaines insuffisances ont été constatées. Les rendements du roulage des farines sans gluten étaient très faibles par rapport à celui obtenu avec la semoule de blé dur ; le plus élevé a été noté avec la farine de maïs (50,30 %) et le plus faible avec la farine de sarrasin (35,70 %). Ce résultat confirme les déclarations notées auprès des enquêtées sur la difficulté de du roulage des farines sans gluten durant la fabrication du couscous. A chaud et à froid, les couscous sans gluten ne gonflent pas autant que le couscous de blé dur, seul le couscous fabriqué par la farine d'amarante a montré un gonflement très élevé et significativement supérieur ($p < 0,05$) à celui du couscous de blé dur. Le couscous d'amarante fait toujours l'exception et se voit avec un degré de désintégration beaucoup plus élevé par rapport aux autres couscous sans gluten et celui de blé dur. Par ailleurs, les autres couscous sans gluten (maïs, sarrasin et quinoa) présentent des degrés de désintégration très intéressants avec des valeurs très faibles ce qui est en faveur de leur qualité culinaire. Il est intéressant de souligner que tous les couscous fabriqués ont des temps de cuisson comparables à celui du couscous de blé dur, sauf le couscous d'amarante qui est sensible à la cuisson et cuit très rapidement avec un faible gain en masse et en volume. Après analyses sensorielles, les couscous sans gluten ont été classés après le couscous de blé dur en mettant le couscous de maïs en premier rang, suivi par le couscous de sarrasin, puis par celui de quinoa et enfin, le couscous d'amarante a été classé en dernière position. A travers l'analyse des profils sensoriels, il se montre que le couscous de maïs et le couscous le plus comparable à celui du couscous de blé dur. Quant aux couscous de sarrasin et de quinoa, ils se caractérisent

par une couleur brune et une odeur plus prononcées, mais ils sont moins collants et plus fermes. Pour le couscous d'amarante, il se distingue par un profil sensoriel différent des autres ; il est très collant, moins ferme et une odeur et une couleur plus perceptibles.

Pour compléter ce travail, il serait souhaitable d'élargir l'étendu de l'enquête à travers d'autres wilayas pour identifier d'autres pratiques pouvant aider à l'amélioration de la qualité du couscous artisanal. Si ces résultats ont permis l'explication de trois pratiques (ajout de la farine de blé tendre, ajout du sel dans d'hydratation et granulation des farines sans gluten), il serait d'une grande importance de les compléter par l'étude d'autres pratiques telles que la précuisson de la semoule avant son hydratation et les différents modes de séchage du couscous précuit. Par ailleurs, les conditions de préparation du couscous (préparation du plat à la consommation) restent non abordées et il sera d'une importance capitale d'explorer les propriétés de réhydratation du couscous sec et l'ensemble des modifications physicochimiques, morphologiques et texturales engendrées par l'opération de la cuisson à la vapeur.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abberger T., Seo A. & Schæfer T. (2002). The effect of droplet size and powder particle size on the mechanisms of nucleation and growth in fluid bed melt agglomeration. *International Journal of Pharmaceutics* 249(1–2), 185-197.
- Abdullah E.C. & Geldart D. (1999). The use of bulk density measurements as flowability indicators. *Powder Technology* 102(2), 151-165.
- Abecassis J., Cuq B., Boggini G. & Namoune H. (2012). Other Traditional Durum-Derived Products, in: Sissons M., Abecassis J., Marchylo B. & Carcea, M. (Eds.), *Durum Wheat: Chemistry and Technology*. AACC International Press, pp. 177-199.
- Aboubacar A. & Hamaker B.R. (2000). Low Molecular Weight Soluble Starch and its Relationship with Sorghum Couscous Stickiness. *Journal of Cereal Science* 31(2), 119-126.
- Aboubacar A., Yazici N. & Hamaker, B.R. (2006). Extent of decortication and quality of flour, couscous and porridge made from different sorghum cultivars. *International Journal of Food Science & Technology* 41(6), 698-703.
- Ahmed A., Khalid N., Ahmad A., Abbasi N.A., Latif M.S.Z. & Randhawa, M.A. (2013). Phytochemicals and biofunctional properties of buckwheat: a review. *The Journal of Agricultural Science* 152(3), 349-369.
- Al-Attabi Z.H., Merghani T.M., Ali A. & Rahman, M.S. (2017). Effect of barley flour addition on the physico-chemical properties of dough and structure of bread. *Journal of Cereal Science* 75, 61-68.
- Almeida-Prieto S., Blanco-Méndez J. & Otero-Espinar F.J. (2007). Microscopic image analysis techniques for the morphological characterization of pharmaceutical particles: Influence of the software, and the factor algorithms used in the shape factor estimation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 67(3), 766-776.
- Al-Yaseri A.Z., Lebedev M., Barifcani A. & Iglauer S. (2016). Receding and advancing (CO₂+brine+quartz) contact angles as a function of pressure, temperature, surface roughness, salt type and salinity. *The Journal of Chemical Thermodynamics* 93, 416-423.

- Amidon G., Ausburger L., Brittain H., Byrn S., Fox C., Peck G. & Wurster D. (1999). Physical test methods for powder flow characterization of pharmaceutical materials: A review of methods, *Pharmaceutics Forum* pp. 8298-8308.
- Aulton M. & Banks M. (1979). Influence of the hydrophobicity of the powder mix on fluidised bed granulation. *International Conference on Powder Technology in Pharmacy, Basel, Switzerland, Powder Advisory Centre.*
- Aulton M., Banks M. & Smith D. (1977). The wettability of powders during fluidized bed granulation. *Journal of Pharmacy and Pharmacology* 29(S1), p. 59.
- Ax K., Feise H., Sochon R., Hounslow M. & Salman A. (2008). Influence of liquid binder dispersion on agglomeration in an intensive mixer. *Powder Technology* 179(3), 190-194.
- Aymard P. (2010). Amélioration nutritionnelle des produits céréaliers par les fibres : un challenge technologique. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 45(5), 246-254.
- Baik B.K. & Lee M.R. (2003). Effects of Starch Amylose Content of Wheat on Textural Properties of White Salted Noodles. *Cereal Chemistry* 80(3), 304-309.
- Barboff M. (2010). Couscous de blé et semoule de maïs au Portugal, Couscous, boulgour et polenta: transformer et consommer les céréales dans le monde, 47 p.
- Barkouti A. (2012). Agglomération humide de poudres à réactivité de surface-Approche mécanistique de la morphogenèse de structures alimentaires agglomérées. *Thèse de Doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc*, 182 p.
- Barkouti A., Delalonde M., Rondet E. & Ruiz T. (2014). Structuration of wheat powder by wet agglomeration: Case of size association mechanism. *Powder Technology* 252(0), 8-13.
- 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(2), 234-240.
- Bastos G.M., Soares Júnior M.S., Caliarri M., de Araujo Pereira A.L., de Moraes C.C. & Campos M.R.H. (2016). Physical and sensory quality of gluten-free spaghetti processed from amaranth flour and potato pulp. *LWT - Food Science and Technology* 65, 128-136.

- Béji-Bécheur A., Ourahmoune N. & Özçağlar-Toulouse N. (2014). The polysemic meanings of couscous consumption in France. *Journal of Consumer Behaviour* 13(3), 196-203.
- Beji-Becheur A. & Ozcaglar-Toulouse N. (2008). Couscous connexion : l'histoire d'un plat migrant. *13^{èmes} Journées de Recherche en Marketing de Bourgogne*, 17 p.
- Bellocq B., Cuq B., Ruiz T., Duri A., Cronin K. & Ring D. (2017a). Impact of fluidized bed granulation on structure and functional properties of the agglomerates based on the durum wheat semolina. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 45, 73-83.
- Bellocq B., Duri A., Cuq B. & Ruiz T. (2018a). 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.
- Bellocq B., Ruiz T. & Cuq B. (2018b). Contribution of cooking and drying to the structure of couscous grains made from durum wheat semolina. *Cereal Chemistry* 95(5), 646-659.
- Bellocq B., Ruiz T., Delaplace G., Duri A. & Cuq B. (2017b). Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates. *Journal of Food Engineering* 195, 235-246.
- Benali M., Gerbaud V. & Hemati M. (2009). Effect of operating conditions and physico-chemical properties on the wet granulation kinetics in high shear mixer. *Powder Technology* 190(1-2), 160-169.
- Benatallah L. (2009). Couscous et pain sans gluten pour malades coeliaques : aptitude technologique de formules à base de riz et de légumes secs. *Thèse de Doctorat, INATAA, Université frères Mentouri Constantine 1*, 163 p.
- Benatallah L., Agli A. & Zidoune M. (2008). Gluten-free couscous preparation: Traditional procedure description and technological feasibility for three rice-leguminous supplemented formulae. *Journal of food, agriculture and environment* 6(2), 105-112.
- Berton B. (2002). Hydratation par adsorption de vapeur d'eau ou par immersion des farines de blé et de leurs constituants. *Thèse de Doctorat, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL*, 215 p.
- Betz G., Bürgin P.J. & Leuenberger H. (2003). Power consumption profile analysis and tensile strength measurements during moist agglomeration. *International Journal of Pharmaceutics* 252(1), 11-25.

- Betz G., Bürgin P.J. & Leuenberger H. (2004). Power consumption measurement and temperature recording during granulation. *International Journal of Pharmaceutics* 272(1), 137-149.
- Bocquet L., Charlaix É. & Restagno F. (2002). Physics of humid granular media. *Comptes Rendus Physique* 3(2), 207-215.
- Bonnan-White J., Hightower A. & Issa A. (2013). Of couscous and occupation: a case study of women's motivations to join and participate in Palestinian fair trade cooperatives. *Agriculture and Human Values* 30(3), 337-350.
- Börner M., Michaelis M., Siegmann E., Radeke C. & Schmidt U. (2016). Impact of impeller design on high-shear wet granulation. *Powder Technology* 295, 261-271.
- Bouasla A. & Wójtowicz A. (2019). Rice-Buckwheat Gluten-Free Pasta: Effect of Processing Parameters on Quality Characteristics and Optimization of Extrusion-Cooking Process. *Foods* 8(10), 496.
- Boucheham N. (2009). Aptitude technologique de trois formules à base de riz pour la fabrication de couscous sans gluten. *Mémoire de Magister, Université des frères Mentouri Constantine I*, 84 p.
- Boudreau A. & Ménard G. (1992). Le blé: éléments fondamentaux et transformation. *Les presses de l'Université Laval, Sainte-Foy, Canada*, 435 p.
- Bouwman A.M., Bosma J.C., Vonk P., Wesselingh J.A., Frijlink H.W. (2004). Which shape factor(s) best describe granules? *Powder Technology* 146(1), 66-72.
- Bushuk W. & Winkler C. (1957). Sorption of water vapor on wheat flour, starch, and gluten. *Cereal Chemistry* 34(2), 73-86.
- Cai L., Farber L., Zhang D., Li F. & Farabaugh J. (2013). A new methodology for high drug loading wet granulation formulation development. *International Journal of Pharmaceutics* 441(1), 790-800.
- Carr R.L. (1965). Evaluating flow properties of solids. *Chemical Engineering* 72, 163-168.
- Castel B. (1996). Mise en forme des solides Procédés et appareils. *Techniques de l'ingénieur* J338, pp. 2-24.

- Cavinato M., Andreato E., Bresciani M., Pignatone I., Bellazzi G., Franceschinis E., Realdon N., Canu P. & Santomaso A.C. (2011). Combining formulation and process aspects for optimizing the high-shear wet granulation of common drugs. *International Journal of Pharmaceutics* 416(1), 229-241.
- Chaker S. (2013). Couscous: sur l'étymologie du mot. 2 p.
- Charles-Williams H., Wengeler R., Flore K., Feise H., Hounslow M.J. & Salman A.D. (2013). Granulation behaviour of increasingly hydrophobic mixtures. *Powder Technology* 238, 64-76.
- Chemache L., Kehal F., Namoune H., Chaalal M., & Gagaoua M. (2018). Couscous: Ethnic making and consumption patterns in the Northeast of Algeria. *Journal of Ethnic Foods* 5(3), 211-219.
- Chemache L. (2011). Qualité de deux spécialités fromagères fabriquées et commercialisées en Algérie. *Mémoire de Magister, INATAA, Université des frères Mentouri Constantine 1*, 90 p.
- Chemache L., Kehal F. & Namoune H. (2012). Partial substitution of milk proteins by crosslinked starch (E 1422) and its effect on the rheological behavior and texture of an imitation cheese manufactured and marketed in Algeria: P090. *Fundamental and Clinical Pharmacology*, p. 26.
- Chillo S., Laverse J., Falcone P.M. & Del Nobile M.A. (2008). Quality of spaghetti in base amaranthus wholemeal flour added with quinoa, broad bean and chick pea. *Journal of Food Engineering* 84(1), 101-107.
- Chowhan Z.T. (1979). Moisture, hardness, disintegration and dissolution interrelationships in compressed tablets prepared by the wet granulation process. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 5(1), 41-62.
- Codex Stan 152-1985. Norme codex pour la farine de blé. *Codex Alimentarius*, 4 p.
- Codex Stan 154-1985. Norme codex pour la farine complète de maïs. *Codex Alimentarius*, 3 p.
- Codex Stan 176-1989. Codex standard for edible cassava flour. *Codex Alimentarius*, 2 p.
- Codex Stan 178-1991. Norme codex pour la semoule et la farine de blé dur. *Codex Alimentarius*, 3 p.

- Codex Stan 202-1995. Norme codex pour le couscous. *Codex Alimentarius*, 3 p.
- Coumoul X., Dardel F. & Blanc E. (2018). Mémo visuel de biochimie - L'essentiel en fiches et en couleurs. *Dunod, Paris*, 240 p.
- Cuq B., Gaiani C., Turchiuli C., Galet L., Scher J., Jeantet R., Mandato S., Petit J., Murrieta-Pazos I., Barkouti A., Schuck P., Rondet E., Delalonde M., Dumoulin E., Delaplace G. & Ruiz T. (2013a). Advances in Food Powder Agglomeration Engineering, in: Jeyakumar H. (Ed.), *Advances in Food and Nutrition Research. Academic Press*, pp. 41-103.
- Cuq B., Mandato S., Jeantet R., Saleh K. & Ruiz T. (2013b). Agglomeration/granulation in food powder production, in: Bhandari B., Bansal N., Zhang M. & Schuck P. (Eds.), *Handbook of Food Powders. Woodhead Publishing*, pp. 150-177.
- D'Egidio M. & Pagani M. (2010). Pasta and couscous: basic foods of Mediterranean tradition. *Tecnica Molitoria International* 61(11/A), 105-114.
- Dacanal G.C. & Menegalli F.C. (2010). Selection of operational parameters for the production of instant soy protein isolate by pulsed fluid bed agglomeration. *Powder Technology* 203(3), 565-573.
- Dadkhah M. & Tsotsas E. (2014). Study of the morphology of solidified binder in spray fluidized bed agglomerates by X-ray tomography. *Powder Technology* 264, 256-264.
- De Paula R., Abdel-Aal E.S.M., Messia M.C., Rabalski I. & Marconi E. (2017). Effect of processing on the beta-glucan physicochemical properties in barley and semolina pasta. *Journal of Cereal Science* 75, 124-131.
- Debbouz A. (1992). Influence of raw material and processing on couscous quality. *Thèse de Doctorat, North Dakota State University*.
- Debbouz A., Dick J. & Donnelly B. (1994). Influence of raw material on couscous quality. *Cereal foods world* 39(4), 231-236.
- Debbouz A. & Donnelly B.J. (1996). Process effect on couscous quality. *American Association of Cereal Chemists* 73(6), 668-671.

- Dédédji M., Ahouansou R. & Hounhouigan D. (2008). Evaluation des performances techniques d'un granuleur mécanique pour la production d'attiéké (couscous de manioc) au Bénin. *Bulletin de la recherche agronomique du Bénin* (61), 7-16.
- Delcour J. & Hosney R.C. (2010). Principles of cereal science and technology authors provide insight into the current state of cereal processing. *Cereal foods world* 55(1), 21-22.
- Demir B., Bilgicli N., Elgun A. & Demir M.K. (2010). The effect of partial substitution of wheat flour with chickpea flour on the technological, nutritional and sensory properties of couscous. *Journal of Food Quality* 33(6), 728-741.
- Demir M. & Demir B. (2016). Utilisation of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) and different legume flours in traditional couscous production in Turkey. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods* 8(1), 157-163.
- Dexter J.E., Preston K.R., Martin D.G. & Gander E.J. (1994). The Effects of Protein Content and Starch Damage on the Physical Dough Properties and Bread-making Quality of Canadian Durum Wheat. *Journal of Cereal Science* 20(2), 139-151.
- Doukani K. (2015). Etude comparative entre le couscous industriel et le couscous à base de glands. *Nature & Technology* (13), 2.
- Drakos A., Kyriakakis G., Evageliou V., Protonotariou S., Mandala I. & Ritzoulis C. (2017). Influence of jet milling and particle size on the composition, physicochemical and mechanical properties of barley and rye flours. *Food Chemistry* 215, 326-332.
- Drumm C., Attarakih M.M. & Bart H.-J. (2009). Coupling of CFD with DPBM for an RDC extractor. *Chemical Engineering Science* 64(4), 721-732.
- El-Khawas F., Pharm M. & Tawashi R. (1966). Water vapor sorption and potential of starch grains. *Journal of the Society of Cosmetic Chemists* 17, 103-114.
- Ennis B. & Litster, J. (1997). Particle size enlargement. In: Perry R. & Green D. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7th edition, McGraw-Hill, New York, pp. 20-56.
- Ennis B.J. (1996). Agglomeration and size enlargement session summary paper. *Powder Technology* 88(3), 203-225.

- Ennis B.J., Li J., Gabriel I T. & Robert P. (1990). The influence of viscosity on the strength of an axially strained pendular liquid bridge. *Chemical Engineering Science* 45(10), 3071-3088.
- Erbaş M., Ertugay M.F. & Certel M. (2005). Moisture adsorption behaviour of semolina and farina. *Journal of Food Engineering* 69(2), 191-198.
- Faure A., York P. & Rowe R.C. (2001). Process control and scale-up of pharmaceutical wet granulation processes: a review. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 52(3), 269-277.
- Faure J. (1989). Transformation industrielle du couscous de mil et de maïs. *Montpellier : CIRAD-IRAT*, 26 p.
- Feillet P. (1986). L'industrie des pâtes alimentaires: technologies de fabrication, qualité des produits finis et des matières premières. *IAA* 10, 979-989.
- Feillet P. (2000). Le grain de blé: composition et utilisation. *Editions Quae*, 291 p.
- Fiorda F.A., Soares M.S., da Silva F.A., Grosmann M.V.E. & Souto L.R.F. (2013). Microstructure, texture and colour of gluten-free pasta made with amaranth flour, cassava starch and cassava bagasse. *LWT - Food Science and Technology* 54(1), 132-138.
- Frost D.J., Adhikari K. & Lewis D.S. (2011). Effect of barley flour on the physical and sensory characteristics of chocolate chip cookies. *Journal of Food Science and Technology* 48(5), 569-576.
- Gagaoua M. & Boudechicha H.R. (2018). Ethnic meat products of the North African and Mediterranean countries: An overview. *Journal of Ethnic Foods* 5(2), 83-98.
- Galiba M., Rooney L., Waniska R. & Miller F. (1987). The Preparation of Sorghum and Millet Couscous in West-Africa. *Cereal foods world* 32(12), 878-885.
- Galiba M., Waniska R.D., Rooney L.W. & Miller F.R. (1988). Couscous quality of sorghum with different kernel characteristics. *Journal of Cereal Science* 7(2), 183-193.
- Ganderton D. & Hunter B.M. (1971). A comparison of granules prepared by pan granulation and by massing and screening. *Journal of Pharmacy and Pharmacology* 23(S1), 1S-10S.

- Gao J.Z.H., Jain A., Motheram R., Gray D.B. & Hussain M.A. (2002). Fluid bed granulation of a poorly water soluble, low density, micronized drug: comparison with high shear granulation. *International Journal of Pharmaceutics* 237(1), 1-14.
- Gianibelli M.C., Sissons M.J. & Batey I.L. (2005). Effect of Source and Proportion of Waxy Starches on Pasta Cooking Quality. *Cereal Chemistry* 82(3), 321-327.
- Gluba T. (2003). The effect of wetting liquid droplet size on the growth of agglomerates during wet drum granulation. *Powder Technology* 130(1-3), 219-224.
- Gluba T. (2005). The energy of bed processing during drum granulation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 44(2), 237-243.
- Goalard C. (2005). Etude physico-chimique du procédé de dispersion des poudres libres et agglomérées en milieu liquide. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse*, 217 p.
- Gobert E. (1940). Usages et rites alimentaires des tunisiens, leur aspect domestique, physiologique et social. *Editions de la Bibliothèque IBLA, Tunis*.
- Gold G., Duvall R.N., Palermo B.T. & Slater J.G. (1966). Powder Flow Studies II: Effect of Glidants on Flow Rate and Angle of Repose. *Journal of pharmaceutical sciences* 55(11), 1291-1295.
- Grando S. & Macpherson H.G. (2005). Food barley: importance, uses and local knowledge. *International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria*, 156 p.
- 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 du blé dur. *Thèse de Doctorat d'Etat, 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(11), 966-971.
- Guezlane L., Abecassis J. & Morel M. (1998a). Effet des traitements hydrothermiques du couscous de blé dur sur le comportement des protéines. *Annales de l'Institut national agronomique-El Harrach (Alger)* 19(1), 72-81.

- Guezlane L., Colonna P. & Abecassis J. (1998b). Effet du traitement hydrothermique du couscous de blé sur les modifications physiques de l'amidon, *Annales de l'Institut national agronomique El Harrach*. ASJP, pp. 62-71.
- 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. & Senator A. (1985). Etude physico-chimique et technologique de deux types de couscous (artisanal et industriel). *Annales de l'Institut national agronomique-El Harrach (Alger)* 5(1), 47-62.
- Hama-Ba F., Silga P. & Diawara B. (2016). Evaluation de la qualité et de l'acceptabilité de couscous à base de trois formulations de farines composites enrichies au soja (*Glycine max*) et au moringa (*Moringa oleifera*). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 10(6), 2497-2510.
- Hammami R., & Sissons M. (2020). Durum Wheat Products, Couscous. In Igrejas G., Ikeda T.M. & Guzmán C. (Eds.), *Wheat Quality For Improving Processing And Human Health*. Springer, International Publishing, pp. 347-367.
- Hancock B.C., York P. & Rowe R.C. (1992). Characterization of wet masses using a mixer torque rheometer: 2. Mixing kinetics. *International journal of pharmaceutics* 83(1), 147-153.
- Hancock B.C., York P. & Rowe R.C. (1994). An assessment of substrate-binder interactions in model wet masses. 1: Mixer torque rheometry. *International journal of pharmaceutics* 102(1), 167-176.
- Hancock B.C., York P., Rowe R.C. & Parker M.D. (1991). Characterization of wet masses using a mixer torque rheometer: 1. Effect of instrument geometry. *International journal of pharmaceutics* 76(3), 239-245.
- Hansuld E.M. & Briens L. (2014). A review of monitoring methods for pharmaceutical wet granulation. *International journal of pharmaceutics* 472(1-2), 192-201.
- Hapgood K.P. & Khanmohammadi B. (2009). Granulation of hydrophobic powders. *Powder Technology* 189(2), 253-262.
- Hapgood K.P., Litster J.D., Biggs S.R. & Howes T. (2002). Drop Penetration into Porous Powder Beds. *Journal of Colloid and Interface Science* 253(2), 353-366.

- Hapgood K.P., Litster J.D. & Smith R. (2003). Nucleation regime map for liquid bound granules. *American Institute of Chemical Engineers* 49(2), 350-361.
- Harwood C.F. & Pilpel N. (1968). Granulation of Griseofulvin. *Journal of pharmaceutical sciences* 57(3), 478-481.
- Hausman D.S. (2004). Comparison of Low Shear, High Shear, and Fluid Bed Granulation During Low Dose Tablet Process Development. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 30(3), 259-266.
- Hebrard A. (2002). Granulation de la semoule de blé dur : Étude et optimisation du procédé d'agglomération des particules de semoule pour l'obtention de couscous, *Thèse de Doctorat, école nationale supérieure agronomique de Montpellier*, 244 p.
- 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(1-3), 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. *3^{ème} Colloque Science et Technologie des Poudres. LAVOISIER, Technique et Documentation, Paris, Nancy, France*, pp. 489-496.
- Hegedűs Á. & Pintye-Hódi K. (2007). Influence of the type of the high-shear granulator on the physico-chemical properties of granules. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 46(10), 1012-1019.
- Hellman N., Boesch T. & Melvin E. (1952). Starch granule swelling in water vapor sorption. *Journal of the American Chemical Society* 74(2), 348-350.
- Holm P., Schaefer T. & Kristensen H.G. (1985). Granulation in high-speed mixers Part V. Power consumption and temperature changes during granulation. *Powder Technology* 43(3), 213-223.
- Hoornaert F., Wauters P.A.L., Meesters G.M.H., Pratsinis S.E. & Scarlett B. (1998). Agglomeration behaviour of powders in a Lödige mixer granulator. *Powder Technology* 96(2), 116-128.
- Horisawa E., Danjo K. & Sunada H. (2000). Influence of Granulating Method on Physical and Mechanical Properties, Compression Behavior, and Compactibility of Lactose and

- Microcrystalline Cellulose Granules. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 26(6), 583-593.
- Houssou P.A., Padonou S.W., Vodouhe M.C., Djivoh H., Dansou V., Hotegni A.B. & Metohoue R. (2016). Improvement of the quality of yêkè-yêkè (corn based couscous) by its enrichment with different legumes seeds in Benin. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 16(3), 573-585.
- Hubert A. (1995). Destins transculturels. *Mille et une bouches. Cuisines et identités culturelles. Paris*, 114-118.
- Idir D. (2000). Influence du taux d'extraction et de la granulométrie de semoule sur la qualité technologique du couscous de blé dur, *Mémoire de Magister. INA, El-Harrach, Alger*, p. 84.
- Islas-Rubio A.R., Calderón de la Barca A.M., Cabrera-Chávez F., Cota-Gastélum A.G. & Beta, T. (2014). Effect of semolina replacement with a raw:popped amaranth flour blend on cooking quality and texture of pasta. *LWT - Food Science and Technology* 57(1), 217-222.
- ISO 2591-1:1988. Test Sieving—Part 1: Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate. *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, pp. 756-762.
- ISO 13320:2009. Particle Size Analysis - Laser Diffraction Methods. *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*.
- Iveson S.M., Litster J.D., Hapgood K. & Ennis B.J. (2001). Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. *Powder Technology* 117(1–2), 3-39.
- Jimenez-Munguia M.T. (2007). Agglomération de particules par voie humide en lit fluidisé. *Thèse de Doctorat, ENSIA (AgroParisTech)*, 122 p.
- Kakou A. (2000). Optimisation des conditions d'application d'une méthode de conservation longue durée de la pâte de manioc (*Manihot esculenta*, Crantz) en vue d'améliorer la qualité alimentaire de l'attiéké et du placali. *Thèse de Doctorat, University of Cocody (Côte d'Ivoire)*, 123 p.
- Kaup S. & Walker C. (1986). Couscous in North Africa. *Cereal foods world, USA* 31, 179-182.

- Keleb E.I., Vermeire A., Vervaet C. & Remon J.P. (2002). Continuous twin screw extrusion for the wet granulation of lactose. *International Journal of Pharmaceutics* 239(1), 69-80.
- Keleb E.I., Vermeire A., Vervaet C. & Remon J.P. (2004). Twin screw granulation as a simple and efficient tool for continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics* 273(1), 183-194.
- Kiribuchi-Otobe C., Nagamine T., Yanagisawa T., Ohnishi M. & Yamaguchi I. (1997). Production of Hexaploid Wheats with Waxy Endosperm Character. *Cereal Chemistry* 74(1), 72-74.
- Knight P.C., Johansen A., Kristensen H., Schaefer T. & Seville J. (2000). An investigation of the effects on agglomeration of changing the speed of a mechanical mixer. *Powder Technology* 110(3), 204-209.
- Knight P.C., Seville J.P.K., Wellm A.B. & Instone T. (2001). Prediction of impeller torque in high shear powder mixers. *Chemical Engineering Science* 56(15), 4457-4471.
- Knight P. (2004). Challenges in granulation technology. *Powder Technology* 140(3), 156-162.
- Kristensen H.G. & Schaefer T. (1987). Granulation: A Review on Pharmaceutical Wet-Granulation. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 13(4-5), 803-872.
- Kuhs M., Moore J., Kollamaram G., Walker G. & Croker D. (2017). Predicting optimal wet granulation parameters for extrusion-spheronisation of pharmaceutical pellets using a mixer torque rheometer. *International Journal of Pharmaceutics* 517(1-2), 19-24.
- Kumar A., Gernaey K.V., Beer T.D. & Nopens I. (2013). Model-based analysis of high shear wet granulation from batch to continuous processes in pharmaceutical production – A critical review. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 85(3, Part B), 814-832.
- Kumar A., Dhondt J., Vercruyse J., De Leersnyder F., Vanhoorne V., Vervaet C., Remon J.P., Gernaey K.V., De Beer T. & Nopens I. (2016). Development of a process map: A step towards a regime map for steady-state high shear wet twin screw granulation. *Powder Technology* 300, 73-82.
- Kumaresan T. & Joshi J.B. (2006). Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal* 115(3), 173-193.

- Lagoudaki M., Demertzis P.G. & Kontominas M.G. (1993). Moisture Adsorption Behaviour of Pasta Products. *LWT - Food Science and Technology* 26(6), 512-516.
- Lai V.M.F., Tomasik P., Yen M.T., Hung W.L. & Lii C.Y. (2001). Re-examination of the interactions between starch and salts of metals from the non-transition groups. *International Journal of Food Science & Technology* 36(3), 321-330.
- Landin M., Rowe R. & York P. (1995). Characterization of wet powder masses with a mixer torque rheometer. 3. Nonlinear effects of shaft speed and sample weight. *Journal of pharmaceutical sciences* 84(5), 557-560.
- Landin M., York P., Cliff M.J., Rowe R.C. & Wigmore A.J. (1996). Scale-up of a pharmaceutical granulation in fixed bowl mixer-granulators. *International Journal of Pharmaceutics* 133(1), 127-131.
- Lee N.Y. (2016). Effects of Blends of Low-Protein Winter Wheat Flour and Barley Byproducts on Quality Changes in Noodles. *Preventive Nutrition and Food Science* 21(4), 361-366.
- Leuenberger H., Bier H. & Sucker H. (1979). Theory of the granulating-liquid requirement in the conventional granulation process. *Pharmaceutical Technology* 3(6), 60-68.
- Leuenberger H., Bier H. & Sucker H. (1981). Determination of the liquid requirement for a conventional granulation process. *Germany Chemical Engineering* 4, 13-18.
- Li J., Freireich B., Wassgren C. & Litster J.D. (2012). A general compartment-based population balance model for particle coating and layered granulation. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 58(5), 1397-1408.
- Lii C. & Lee B. (1993). Heating A-, B-, and C-type starches in aqueous sodium chloride: effects of sodium chloride concentration and moisture content on differential scanning calorimetry thermograms. *Cereal Chemistry* 70, 188-188.
- Lindberg N., Wenngren L. & Leander L. (1974). Studies on granulation in a change can mixer. *Acta pharmaceutica Suecica* 11(6), 603.
- Lorusso A., Verni M., Montemurro M., Coda R., Gobbetti M. & Rizzello C.G. (2017). Use of fermented quinoa flour for pasta making and evaluation of the technological and nutritional features. *LWT - Food Science and Technology* 78, 215-221.

- Machado Alencar N.M., Steel C.J., Alvim I.D., de Moraes E.C. & Andre Bolini H.M. (2015). Addition of quinoa and amaranth flour in gluten-free breads: Temporal profile and instrumental analysis. *LWT - Food Science and Technology* 62(2), 1011-1018.
- Machado V.G., Hirata T.A.M. & Menegalli F.C. (2014). Agglomeration of soy protein isolate in a pulsed fluidized bed: Experimental study and process optimization. *Powder Technology* 254(0), 248-255.
- Mandato S. (2012). Génie des procédés d'agglomération de poudres alimentaires: éléments de phénoménologie des apports d'eau et d'énergie mécanique, *Thèse de Doctorat. Montpellier, SupAgro*, 230 p.
- Mehta A., Zoglio M.A. & Carstensen J.T. (1978). Ball Milling as a Measure of Crushing Strength of Granules. *Journal of pharmaceutical sciences* 67(7), 905-908.
- Méot J.M. (2006). Couscous technology. *Actes du Congrès Scientifique International "Santé & Environnement"*, Groupe Clextra, France, pp. 61-77.
- Merkus H.G. (2009a). Overview of size characterization techniques. *Particle Size Measurements*, 17, 137-194.
- Merkus H.G. (2009b). Particle size measurements: fundamentals, practice, quality. *Springer Science & Business Media*, 534 p.
- Messia M.C., Oriente M., Angelicola M., De Arcangelis E. & Marconi E. (2019). Development of functional couscous enriched in barley β -glucans. *Journal of Cereal Science* 85, 137-142.
- 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 de Magister, INATAA, Université des frères Mentouri Constantine 1*, 114 p.
- Mohamad Saad M., Gaiani C., Scher J., Cuq B., Ehrhardt J.J. & Desobry S. (2009). Impact of re-grinding on hydration properties and surface composition of wheat flour. *Journal of Cereal Science* 49(1), 134-140.
- Morin G. & Briens L. (2014). A comparison of granules produced by high-shear and fluidized-bed granulation methods. *American Association of Pharmaceutical Scientists PharmSciTech* 15(4), 1039-1048.

- Mörl L., Heinrich S. & Peglow M. (2007). Fluidized bed spray granulation, in: Salman A.D., Hounslow M.J. & Seville J.P.K., *Handbook of Powder Technology*. Elsevier Science B.V., pp. 21-188.
- Mota-Aguilar D.A. & Velázquez C. (2015). Dynamics of the dry premixing stage of a hydrophobic formulation and potential implications on the wet granulation process. *Powder Technology* 286, 318-324.
- Murrieta-Pazos I., Galet L., Patry S., Gaiani C. & Scher J. (2014). Evolution of particle structure during water sorption observed on different size fractions of durum wheat semolina. *Powder Technology* 255(0), 66-73.
- Nasralla R.A., Bataweel M.A. & Nasr-El-Din H.A. (2011). Investigation of Wettability Alteration by Low Salinity Water. In *Proceedings of the Conference Name*, Conference Location, 12 p.
- Newitt D. & Conway J. (1958). A contribution to the theory and practice of granulation. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* 36, 422-442.
- NF P18-560:1990. Granulats. Analyse granulométrique par tamisage. *Association française de normalisation*.
- NF T51-042:1967. Détermination de la masse volumique apparente du produit tassé. *Association française de normalisation*.
- Nguyen Q.C., Wahlgren M.B., Almlı V.L. & Varela P. (2017). Understanding the role of dynamic texture perception in consumers' expectations of satiety and satiation. A case study on barley bread. *Food Quality and Preference* 62, 218-226.
- Nikolić N., Sakač M. & Mastilović J. (2011). Effect of buckwheat flour addition to wheat flour on acylglycerols and fatty acids composition and rheology properties. *LWT - Food Science and Technology* 44(3), 650-655.
- Ocieczek A. (2007). Comparison of sorption properties of semolina and farina. *Acta Agrophysica* 9(1), 135-145.
- Oka S., Emady H., Kašpar O., Tokárová V., Muzzio F., Štěpánek F. & Ramachandran R., (2015a). The effects of improper mixing and preferential wetting of active and excipient ingredients on content uniformity in high shear wet granulation. *Powder Technology* 278, 266-277.

- Oka S., Kašpar O., Tokárová V., Sowrirajan K., Wu H., Khan M., Muzzio F., Štěpánek F. & Ramachandran R. (2015b). A quantitative study of the effect of process parameters on key granule characteristics in a high shear wet granulation process involving a two component pharmaceutical blend. *Advanced Powder Technology* 26(1), 315-322.
- Oosten B. (1990). Interactions between starch and electrolyte. *Starch-Staerke, Germany* 42(9), 327-330.
- Oosten B.J. (1982). Tentative Hypothesis to Explain How Electrolytes Affect the Gelatinization Temperature of Starches in Water. *Starch - Stärke* 34(7), 233-239.
- Ouchiyama N. & Tanaka T. (1980). Stochastic model for compaction of pellets in granulation. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 19(4), 555-560.
- Oulahna D., Cordier F., Galet L. & Dodds J.A. (2003). Wet granulation: the effect of shear on granule properties. *Powder Technology* 130(1-3), 238-246.
- Oulahna D., Hebrard A., Cuq B., Abecassis J. & Fages J. (2012). Agglomeration of durum wheat semolina: Thermodynamic approaches for hydration properties measurements. *Journal of Food Engineering* 109(3), 619-626.
- 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 Journal* 83(4), 377-384.
- Palzer S. (2011). Agglomeration of pharmaceutical, detergent, chemical and food powders. Similarities and differences of materials and processes. *Powder Technology* 206(1), 2-17.
- Pietsch W. (1997). Size Enlargement by Agglomeration, in: Fayed M.E. & Otten, L., *Handbook of Powder Science & Technology*. Springer US, Boston, MA, pp. 202-377.
- Quaglia G. (1988). Other durum wheat products, in: Fabriani, G., Lintas, C. (Eds.), *Durum Chemistry and Technology*. American Association Cereal Chemistry, St. Paul, MN, pp. 263-282.
- Rahmani N. & Muller H.G. (1996). The fate of thiamin and riboflavin during the preparation of couscous. *Food Chemistry* 55(1), 23-27.

- Rajniak P., Mancinelli C., Chern R.T., Stepanek F., Farber L. & Hill B.T. (2007). Experimental study of wet granulation in fluidized bed: Impact of the binder properties on the granule morphology. *International Journal of Pharmaceutics* 334(1–2), 92-102.
- Ramachandran R., Poon J.M.H., Sanders C.F.W., Glaser T., Immanuel C.D., Doyle F.J., Litster J.D., Stepanek F., Wang F.Y. & Cameron I.T. (2008). Experimental studies on distributions of granule size, binder content and porosity in batch drum granulation: Inferences on process modelling requirements and process sensitivities. *Powder Technology* 188(2), 89-101.
- Regina K.E., Antoine A.A., Fafadzi E.A., Diawara B., Sébastien N.L. & Philippe T. (2015). production d'attieke (couscous a base de manioc fermente) dans la ville d'Abidjan. *European Scientific Journal* 11(15), 277-292.
- Rieder A., Ballance S., Løvaas A. & Knutsen S.H. (2015). Minimizing molecular weight reduction of β -glucan during barley bread making. *LWT - Food Science and Technology* 64(2), 767-774.
- Ritala M., Holm P., Schaefer T. & Kristensen H.G. (1988). Influence of Liquid Bonding Strength on Power Consumption During Granulation in a High Shear Mixer. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 14(8), 1041-1060.
- Rizzello C.G., Lorusso A., Montemurro M. & Gobbetti M. (2016). Use of sourdough made with quinoa (*Chenopodium quinoa*) flour and autochthonous selected lactic acid bacteria for enhancing the nutritional, textural and sensory features of white bread. *Food Microbiology* 56, 1-13.
- Roman-Gutierrez A., Sabathier J., Guilbert S., Galet L. & Cuq B. (2003). Characterization of the surface hydration properties of wheat flours and flour components by the measurement of contact angle. *Powder Technology* 129(1), 37-45.
- Rondet E. (2008). Texturation capillaire de milieux granulaires humides. *Thèse de Doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc*, 222 p.
- Rondet E., Delalonde M., Ruiz T. & Desfours J.P. (2010). Fractal formation description of agglomeration in low shear mixer. *Chemical Engineering Journal* 164(2–3), 376-382.

- Rondet E., Ruiz T. & Cuq B. (2013). Rheological and mechanical characterization of wet agglomerates processed in low shear mixer. *Journal of Food Engineering* 117(1), 67-73.
- Rouquerol F., Luciani L., Llewellyn P., Denoyel R. & Rouquerol J. (2003). Texture des matériaux pulvérulents ou poreux. *Techniques de l'ingénieur*. Analyse et caractérisation, pp. 1024-1050.
- Rouquerol J. & Rouquerol F. (2014). Adsorption at the Liquid–Solid Interface: Thermodynamics and Methodology, in: Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K.S.W., Llewellyn P. & Maurin G., Adsorption by Powders and Porous Solids (Second Edition). *Academic Press, Oxford*, pp. 105-158.
- Rowe R.C. (1996). Characterization of wet powder masses using a mixer torque rheometer. 4. Effect of blade orientation. *International Journal of Pharmaceutics* 133(1), 133-138.
- Rowe R.C. & Sadeghnejad G.R. (1987). The rheology of microcrystalline cellulose powder/water mixes — measurement using a mixer torque rheometer. *International Journal of Pharmaceutics* 38(1), 227-229.
- Rumpf H. (1962). The strength of granules and agglomerates. *Agglomeration-Proceedings of the First International Symposium on Agglomeration, Philadelphia*, pp. 379-418.
- Saad M., Sadoudi A., Rondet E. & Cuq B. (2011a). Morphological characterization of wheat powders, how to characterize the shape of particles? *Journal of Food Engineering* 102(4), 293-301.
- Saad M.M., Barkouti A., Rondet E., Ruiz T. & Cuq B. (2011b). Study of agglomeration mechanisms of food powders: Application to durum wheat semolina. *Powder Technology* 208(2), 399-408.
- Sabanis D., Makri E. & Doxastakis G. (2006). Effect of durum flour enrichment with chickpea flour on the characteristics of dough and lasagne. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86(12), 1938-1944.
- Sakr W.F., Ibrahim M.A., Alanazi F.K. & Sakr A.A. (2012). Upgrading wet granulation monitoring from hand squeeze test to mixing torque rheometry. *Saudi Pharmaceutical Journal* 20(1), 9-19.

- Saleh K. & Guigon P. (2009a). Caractérisation et analyse des poudres: Propriétés physiques des solides divisés. *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés* J2251, 1-14.
- Saleh K. & Guigon P. (2009b). Mise en œuvre des poudres: Techniques de granulation humide et liants. *Techniques de l'ingénieur. Génie des procédés*, J2254, 1-20.
- Samrakandi H. (2006). Manger au Maghreb: Approche pluridisciplinaire des pratiques de table en Méditerranée du moyen-âge à nos jours. *Presses Univ. du Mirail*, 199 p.
- Sanz-Penella J.M., Wronkowska M., Soral-Smietana M. & Haros M. (2013). Effect of whole amaranth flour on bread properties and nutritive value. *LWT - Food Science and Technology* 50(2), 679-685.
- Sasaki T. & Matsuki J. (1998). Effect of Wheat Starch Structure on Swelling Power. *Cereal Chemistry* 75(4), 525-529.
- Sastry K.V.S. & Fuerstenau D.W. (1973). Mechanisms of agglomerate growth in green pelletization. *Powder Technology* 7(2), 97-105.
- Schaafsma S.H., Kossen N.W.F., Mos M.T., Blauw L. & Hoffmann A.C., (1999). Effects and control of humidity and particle mixing in fluid-bed granulation. *American Institut of Chemical Engineering Journal* 45(6), 1202-1210.
- Schæfer T. & Mathiesen C. (1996). Melt pelletization in a high shear mixer. IX. Effects of binder particle size. *International Journal of Pharmaceutics* 139(1), 139-148.
- Scott A.C., Hounslow M.J. & Instone T. (2000). Direct evidence of heterogeneity during high-shear granulation. *Powder Technology* 113(1-2), 205-213.
- Seem T.C., Rowson N.A., Ingram A., Huang Z., Yu S., de Matas M., Gabbott I. & Reynolds G.K. (2015). Twin screw granulation — A literature review. *Powder Technology* 276, 89-102.
- Seo A., Holm P. & Schæfer T. (2002). Effects of droplet size and type of binder on the agglomerate growth mechanisms by melt agglomeration in a fluidised bed. *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 16(3), 95-105.
- Serpelloni M. & Boonaert J.-P. (1996). Pulverulent mannitol of moderate friability and process for its preparation. *U.S. patent 5*, 573-777.

- Sharma P. & Gujral H.S. (2014). Cookie making behavior of wheat–barley flour blends and effects on antioxidant properties. *LWT - Food Science and Technology* 55(1), 301-307.
- Shi L., Feng Y. & Sun C.C. (2011). Origin of profound changes in powder properties during wetting and nucleation stages of high-shear wet granulation of microcrystalline cellulose. *Powder Technology* 208(3), 663-668.
- Sidib S., Diarra M. & Scheuring J. (1981). Sorghum couscous: quality considerations. *Proceedings from the International Symposium on Sorghum Grain Quality. ICRISAT Center, Patancheru, India*, pp. 110-112
- Sindhu R. & Khatkar B.S. (2016). Composition and Functional Properties of Common Buckwheat (*Fagopyrum Esculentum Moench*) Flour and Starch. *International Journal of Innovative Research and Advanced Studies*, 3(7), 154-159.
- Sindhuja A., Sudha M.L. & Rahim A. (2005). Effect of incorporation of amaranth flour on the quality of cookies. *European Food Research and Technology* 221(5), 597.
- Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J. & Siemieniowska T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry* 57(4), 603-619.
- Singh N., Kaur L., Sandhu K.S., Kaur J. & Nishinari K. (2006). Relationships between physicochemical, morphological, thermal, rheological properties of rice starches. *Food Hydrocolloids* 20(4), 532-542.
- Sosa M., Califano A. & Lorenzo G. (2019). Influence of quinoa and zein content on the structural, rheological, and textural properties of gluten-free pasta. *European Food Research and Technology*, 245(2), 343-353.
- Soulaka A.B. & Morrison W.R. (1985). The bread baking quality of six wheat starches differing in composition and physical properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 36(8), 719-727.
- Stahl H. (2004). Comparing different granulation techniques. *Pharmaceutical Technology Europe* 16(11), 23-33.

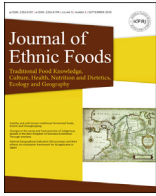
- Sullivan P., O'Flaherty J., Brunton N., Arendt E. & Gallagher E. (2010). Fundamental rheological and textural properties of doughs and breads produced from milled pearled barley flour. *European Food Research and Technology* 231(3), 441-453.
- Suresh P., Sreedhar I., Vaidhiswaran R. & Venugopal A. (2017). A comprehensive review on process and engineering aspects of pharmaceutical wet granulation. *Chemical Engineering Journal* 328, 785-815.
- Tardos G.I., Khan M.I. & Mort P.R. (1997). Critical parameters and limiting conditions in binder granulation of fine powders. *Powder Technology* 94(3), 245-258.
- Tester R.F. & Morrison W.R. (1990). Swelling and gelatinization of cereal starches. I. Effects of amylopectin, amylose, and lipids. *Cereal chemistry* 67(6), 551-557.
- Teunou E. & Poncelet D. (2002). Batch and continuous fluid bed coating – review and state of the art. *Journal of Food Engineering* 53(4), 325-340.
- Tigroudja F. & Bendjoudiouadda A. (1998). Influence de la granulométrie de la semoule sur la qualité technologique du couscous artisanal de blé dur, *Mémoire d'Ingénieur d'Etat. INA, El-Harrach, Alger*, p. 85.
- Toumi L.B., Rezzak S. & Allia K. (2013). Wet Granulation of Cereal Grains in a Tapered Fluidized Bed. *Chemical Engineering* 32, 2149-2154.
- Travers D., Rogerson A. & Jones T. (1975). Proceedings: A torque arm mixer for studying wet massing. *The Journal of pharmacy and pharmacology* 27, p. 3.
- Turchiuli C., Eloualia Z., El Mansouri N. & Dumoulin E. (2005). Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties. *Powder Technology* 157(1), 168-175.
- Turkut G.M., Cakmak H., Kumcuoglu S. & Tavman S. (2016). Effect of quinoa flour on gluten-free bread batter rheology and bread quality. *Journal of Cereal Science* 69, 174-181.
- Van den Dries K., de Vegt O.M., Girard V. & Vromans H. (2003). Granule breakage phenomena in a high shear mixer; influence of process and formulation variables and consequences on granule homogeneity. *Powder Technology* 133(1), 228-236.
- Vansteelandt J. & Delcour J.A. (1999). Characterisation of Starch from Durum Wheat (*Triticum durum*). *Starch - Stärke* 51(2-3), 73-80.

- Vervaet C. & Remon J.P. (2005). Continuous granulation in the pharmaceutical industry. *Chemical Engineering Science* 60(14), 3949-3957.
- Wade J.B., Martin G.P. & Long D.F. (2014). Feasibility assessment for a novel reverse-phase wet granulation process: The effect of liquid saturation and binder liquid viscosity. *International Journal of Pharmaceutics* 475(1), 450-461.
- Walker G.M., Andrews G. & Jones D. (2006). Effect of process parameters on the melt granulation of pharmaceutical powders. *Powder Technology* 165(3), 161-166.
- Wang S., Opassathavorn A. & Zhu F. (2015). Influence of Quinoa Flour on Quality Characteristics of Cookie, Bread and Chinese Steamed Bread. *Journal of Texture Studies* 46(4), 281-292.
- Watano S., Imada Y., Hamada K., Wakamatsu Y., Tanabe Y., Dave R.N. & Pfeffer R. (2003). Microgranulation of fine powders by a novel rotating fluidized bed granulator. *Powder Technology* 131(2), 250-255.
- Watts B.M., Ylimaki G., Jeffery L. & Elias L. (1991). Méthodes de base pour l'évaluation sensorielle des aliments. *Centre de recherches pour le développement international (CRDI), Ottawa, Canada*, 145 p.
- Yamamori M. (2009). Amylose content and starch properties generated by five variant Wx alleles for granule-bound starch synthase in common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica* 165(3), 607-614.
- Yamamori M. & Quynh N. (2000). Differential effects of Wx-A1,-B1 and-D1 protein deficiencies on apparent amylose content and starch pasting properties in common wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 100(1), 32-38.
- Yettou N. (1998). Les méthodes instrumentales d'appréciation de la qualité culinaire du couscous de blé dur, *Mémoire de Magister, INA, El-Harrach, Alger*.
- 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(12), 844-847.
- Yousfi L. (2002). Influence des conditions de fabrication sur la qualité du couscous industriel et artisanal, *Mémoire de Magister*. Université frères Mentouri Constantine 1, p. 141.

- Ziane M., Desriac N., Le Chevalier P., Couvert O., Moussa-Boudjemaa B. & Leguerinel I. (2014). Identification, heat resistance and growth potential of mesophilic spore-forming bacteria isolated from Algerian retail packaged couscous. *Food Control* 45(0), 16-21.
- Ziane M., Leguerinel I. & Membré J.-M. (2018). A quantitative microbiological exposure assessment of *Bacillus cereus* group IV in couscous semolina, Algeria. *Microbial Risk Analysis* 11, 11-22.

Annexes

Publications scientifiques

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Journal of Ethnic Foods

journal homepage: <http://journalofethnicfoods.net>

Original Article

Couscous: Ethnic making and consumption patterns in the Northeast of Algeria

Loucif Chemache ^{a, **}, Farida Kehal ^b, Hacène Namoune ^a, Makhlof Chaalal ^a, Mohammed Gagaoua ^{c, *}^a Laboratoire de Nutrition et Technologie Alimentaire (LNTA), Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (INATAA), Université Frères Mentouri Constantine 1, Route de Ain-El-Bey, Constantine, Algeria^b Laboratoire de Biotechnologie et Qualité des Aliments (BIOQUAL), Institut de la Nutrition, de l'Alimentation et des Technologies Agro-Alimentaires (INATAA), Université Frères Mentouri Constantine 1, Route de Ain-El-Bey 25000, Constantine, Algeria^c Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR Herbivores, Saint-Genès-Champanelle, 63122, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 April 2018

Received in revised form

13 August 2018

Accepted 15 August 2018

Available online 23 August 2018

Keywords:

Algeria

Couscous

Couscous-based dishes

Semolina

Traditional preparation

ABSTRACT

Couscous is an ancient dish that is nearly ubiquitous throughout the North African countries. It is well known as a staple dish in Algeria as many differences can be found concerning its ethnic preparation and making. The present work, based on a survey, aimed to identify the traditional making diagram of couscous and to describe how couscous-based dishes are prepared. The consumption patterns were also identified in the Northeastern localities of Algeria. This study was undertaken through direct interviews with 517 persons who prepared Couscous using the traditional practices in the regions of Bejaia, Jijel, Constantine, Guelma, Oum El bouaghi, Khenchela, and Batna. From the survey, it seems that the first step of couscous making is a size classification of durum wheat semolina into coarse semolina (> 500 µm) and fine semolina (< 500 µm). The second step consists in steaming of coarse semolina before its hydration with salted water. The rolling calibration includes three substeps: nucleation, shaping, and finishing. The addition of cornstarch or wheat flour is performed during the finishing substep. After wet couscous steaming, the precooked couscous is dried under the shade followed by their exposure to the sun. The final step of couscous preparation is the packaging of dried couscous by adding some preservative and flavoring products. Couscous is prepared for several local events, family celebrations, or religious feasts with vegetable sauces and different meat sources such as red meat, chicken meat, fish, or ethnic meat-based products such as *guedid*, *douara*, *bouzelouf*, or *merguez*. Another variant of couscous, *mesfouf*, is further prepared with finely rolled semolina and some butter.

© 2018 Korea Food Research Institute. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction

Couscous is a worldwide cereal product prepared by wet agglomeration of durum wheat semolina [1–3] that has been subjected to physical treatments such as steaming and drying. The couscous is eaten salty, sweet, with fresh and fermented milk (*l'ben* and *raib*), and with different kinds of meat or ethnic meat-based products [4].

The different physicochemical changes induced by the agglomeration steps confer its technological and sensory properties to the

final couscous. The high quality of couscous is defined as a product with regular and homogeneous particle size, which must be amber yellow. After cooking, the grains of couscous should remain individualized without disintegrating or sticking together [5].

In Algeria, the traditionally (ethnic) prepared couscous began to be less consumed in favor of the industrial one. This may be explained by the lack of commercial availability and gradual decadence of the traditional practices due to globalization. In addition, the reason would be due to sociological and economic aspects related to the women's activities outside the home. Furthermore, despite the progress achieved at the industrial scale, reproducing the quality of traditional couscous remains a challenging task for the manufacturers. Accordingly, the consumption tendency of industrial couscous is accompanied by its disqualification compared with traditional couscous, and consumers attest

* Corresponding author. Equipe BIOM, Université Clermont Auvergne, INRA, VetAgro Sup, UMR Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France.

** Corresponding author.

E-mail addresses: chemache_loucif@yahoo.fr, chemache.loucif@umc.edu.dz (L. Chemache), gmb2001@yahoo.fr, mohammed.gagaoua@inra.fr (M. Gagaoua).

that homemade couscous is better [6,7]. On another hand, traditional preparation practices are a very complex as there are differences from a country to another, from a region to another, and from a manufacturer to another. Some studies have investigated the differences between industrial and traditional couscous [8–10]. Similarly, others studies have assessed the quality of couscous produced by various industrial processes [11–13].

This article aims to report the traditional couscous making in the Northeast of Algeria and to identify the traditional diagram of couscous making and preparation by describing the main preparation steps and practices related to the knowledge of people on couscous making in Algeria. In addition, the sociocultural and religious aspects, the preparation, and the consumption patterns of couscous-based dishes were reported. Moreover, the results of a survey carried out in different localities in the Northeast of Algeria with families preparing durum wheat couscous were reported.

2. Couscous in Algeria: tradition, history, sociocultural aspects, and consumption patterns

Couscous or *seksu* (ⵙⴰⴽⵔⵉ) in Berber language or *kuskus* in Arabic is by origin a Numidian (the Berber population of Numidia) dish of small steamed balls of crushed durum wheat semolina that is traditionally served with a stew spooned on top. However, there are few scientific publications that are reported about this ethnic food product of the Maghreb countries or Berber world (Northern Africa). Thus, in the following sections, we will describe the origin, history, sociocultural and religious aspects, making, and consumption habits of couscous in the Northeast of Algeria.

2.1. Origin and history of couscous in Algeria and the role of Berbers in its development

As for pasta or rice that is a staple food for Italians or Chinese, couscous is a staple food and a symbol of food identity for the people of the Maghreb countries, which are by origin Berber. Thus, recognized as a traditional North African delicacy, it is a common cuisine component among Maghreb countries.

The etymology of the word *kuskus*, known worldwide, may be derived from the Arabic word *Kaskasa*, meaning “to pound small” which would also relate to the sound that arises during its preparation when grains are sieved, giving rise to the noise that sounds “keskes” [14], or also from the Berber *seksu*, meaning “well rolled” or “well formed”. This would have further given the name to the cooked dish as well as to the utensil in which the steamed grains are cooked over a cooking pot (*borma*) on which it adjusts: The whole setup forms the *couscoussier* as shown in Fig. 1. A *couscoussier* is a

traditional double-chambered food steamer used by North Africans (in Berber and Arabic cuisines), and now worldwide, to cook couscous. The steam-cooking pot is called *couscoussier* in French, *taseksut* in Berber, and *kaskas* in Arabic. As shown in Fig. 1, it is typically made of two interlocking pots, of either the traditional ceramic or metal (steel, aluminum, or copper). The first, the base, which is the larger one, holds water or soup used to produce steam in the meat and vegetables to be cooked as a stew. The second, the smaller pot, which is designed to be placed on the top, has a lid and perforated floor, so that it holds the couscous in place while allowing the steam to enter and seep through the grains, letting the couscous absorb the flavor from the stew. Once the couscous is steam cooked, the lower pot is kept at simmer until the cooking is complete, and the prepared dish is served.

Concerning the origin of couscous, different viewpoints were postulated, but the most prevalent is that of Berber origin. For example, the culinary historian Lucie Bolens describes primitive pots that very closely resemble the main cooking utensil of couscous, which is *couscoussier* found in tombs in Kabylia dating back to the reign of Berber king Massinissa between 238 and 149 BC [15]. On another hand, it is in North Africa that nearly two thousand years ago, the Berbers invented an original way to prepare the semolina of wheat: rolling it, slightly moistened, into small spherical and succulent grains, light, fragrant, and nourishing, giving a fluffy mass. Neither in the ancient world nor in the oriental Arab world are we aware of this way of treating grains. Couscous was the basic cereal preparation of the Berbers even before the Arabic conquest. Using barley or wheat, it was certainly more important than the bread [16].

Couscous is still prepared manually until today. For this, several utensils are used. The humidification and rolling of the semolina are carried out on the “*gasaa*”, which is a very broad dish and hollow plate in terra cotta or wood (Fig. 2A and B). Sizing and calibration of the grains of wet couscous are made by sieving through sieves (Fig. 2C) and steaming with a terra cotta *couscoussier* (Fig. 1A–C). From homemade and manual preparation, the couscous became semiindustrial for the first time in Algeria with the introduction of milling industries by the Ricci establishment in Blida in 1853 or Ferrero in Algiers [7]. Details concerning the ethnic preparation of couscous in Algeria, obtained from a survey, with a focus on the Northeast region, are detailed in the following.

2.2. Sociocultural and religious aspects related to couscous preparation and consumption in Algeria

In Algeria, the types of couscous are much diversified, and couscous is considered the staff of life and the iconic dish for all Algerians. Indeed, there are as many variants as regions, seasons, or



Fig. 1. Examples of *couscoussier*, traditional steamers for preparing couscous, that are made by ceramic (A and B) or metal (aluminum) (C).



Fig. 2. Pictures of *gasaa* made of wood (A and B) and a sieve (C) known as *Gherbal* in Arabic and *Agherval* in Berber languages.

parties. It is called “*seksu*” in Kabylia region, “*taberbouchet*” in the Aurès, “*ta'am*” (Arabic for “food”) in the Ouled-Naïl, “*lem'hawar*” among the people of Mila, and “*naâma*” among those of Constantine region. In the region of Chenoua, “*taâm oubelout*” or “acorn-based couscous” is prepared. As stated previously, couscous is served with a sauce called “*marka*” made of different vegetables [2] such as tomatoes, onions, zucchini, turnips, garlic, beans, chickpeas, as well as white or red meat and condiments (*Ras el hanout*, coriander, pepper, salt, or even chili to have a kitchen raised). Among these, *Ras el hanout* is a spice blend of cardamom, coriander seeds, nutmeg, cinnamon, pepper, clove, turmeric, ginger, and cumin typical to Maghreb region that exist now and is used worldwide. Some regions in Algeria, namely those that are near the Mediterranean Sea (north of the country such as Jijel and Collo), people prepare couscous with fish. For the different meat and meat products that are consumed with couscous, the reader would refer to the recent comprehensive review concerning North African ethnic meat products by Gagaoua and Boudechicha [4] and the subsection Consumption patterns of couscous.

At each ceremony, its own couscous that is prepared for the day or several days. For example, there is the sweetened “*mesfouf*” with honey and dried raisins or “*seffa*” with butter, raisins, cinnamon, orange blossom, and blanched almonds consumed in the west of the country. There is also the fermented couscous, which is brownish, called “*lemzeiet*” [17] that is made from fermented wheat in the region of Constantine (Northeast of Algeria). *Lemzeiet* is obtained after the storage of grains of durum wheat for several years in underground silos called *matmor*, used historically for the storage of wheat. After rainwater seepage inside *matmor*, flooded wheat with spontaneous fermentation offers new features with a typical flavor, texture change, and a dark brown color [18].

The couscous with seven vegetables is part of the offerings that the Berbers offer to celebrate *Yennayer*, the Berber New Year that is now at 2968 corresponding to 2018. At the same occasion, the couscous is also prepared as “*avissar*”, a wheat semolina-based dish prepared in Kabylia region during winter with poultry as meat. Couscous is also consumed during the month of Ramadan for the beneficial effects on the health of the fasters. Ramadan corresponds to the ninth month of the Islamic calendar and is observed by Muslims worldwide as a month of fasting. Thus, this annual observance is regarded as one of the five pillars of Islam. On another hand and nutritionally, couscous is a dish with rich digestible properties. There is also the preparation of coarse couscous cooked with the feet of the ram or calf slaughtered on the occasion of “*Eid al-Adha*” [4]. Couscous is also the traditional meal after “*salaat-ul-jumu'ah*”, a congregational prayer held at mosques every Friday immediately after noon. Thus, there is no special occasion or holiday without couscous. Finally, it seems that on many occasions, couscous is present, during parties, wedding, banquets, birth, circumcision, and many other occasions [19].

These previously cited dishes are the products of a long socio-cultural process that has its origin in the past; on these occasions, couscous and tradition are strongly intertwined and now prepared in cities, mountains, and deserts. Thus, couscous is known as the dish of both the rich and the poor. Couscous adapts to the specific means and conditions of each family and community, which explains its permanence and ability to evolve. The spirit of sociability and conviviality characterizes this dish of sharing par excellence. It is also a bond that strengthens friendship and further strengthens family alliances. In addition, it means links, reconciliations, sharing, and solidarity. Couscous is the dish of hospitality and generosity. It refers to the founding principle of all human community and solidarity.

2.3. Consumption patterns of couscous

Couscous is consumed in different ways but is well known to be consumed with a vegetable sauce. The latter can be prepared with vegetables, pulses, and different types of meat, making the dish of couscous a complete one. When preparing the sauce, up to three vegetables can be put at the same time. The most commonly encountered and those cited previously are carrots, green beans, zucchini, potatoes, turnips, chard, cabbage, tomatoes, etc. Onion and garlic are added to the sauce as spices.

The data obtained during our survey which will be detailed in the following showed that couscous is consumed with different kinds of meat or meat-based ethnic products, most of which are recently reported by Gagaoua and Boudechicha [4]. Couscous dish is for example accompanied by chicken meat, red meat (beef and sheep meat), dried meat known as *guedid* or *achedhlouh* by berbers [4], offal of butchered animals (stomachs and intestines) known as *douara* [4] and *bouzelouf* [4], sausages such as *merguez* [4], and even with fish (Fig. 3).

Couscous is also prepared and eaten with vegetables such as fava bean, pea, and onion or fruits such as dried and fresh raisins and dates. In this case, the sauce is replaced with curdled milk known as *raib* or fermented milk *l'ben* or *jben* [20]; this dish is called *mesfouf* (Fig. 4).

2.4. Other ethnic foods in the Northeast of Algeria

In addition to couscous, many other ethnic foods are prepared and eaten in Algeria. We cite some examples only in this article, and the reader would refer to the comprehensive review that exists in this topic [21–23]. For example, two types of flat bread are prepared, *kasra* and *khobz eddar* [23]. The latter is prepared during weddings and religious feasts and especially during Ramadan. *Frekeh* is also an ancient and traditional whole wheat product produced from early harvested wheat at the milky stage, generally the durum wheat [21,22]. For cakes, we can cite *makroud* and *bradj*. These traditional products are prepared from very specific raw

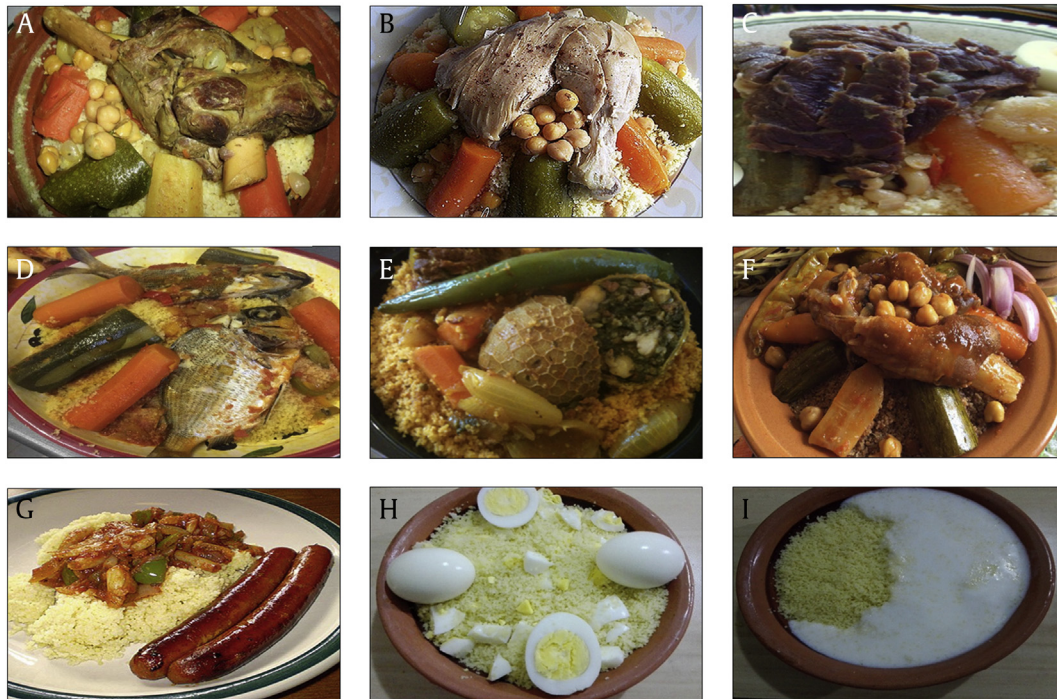


Fig. 3. Photographs of couscous dishes showing the different kinds of meat and meat-based ethnic products used for the preparation or consumption of couscous with (A) red meat from beef or mutton, (B) chicken meat, (C) *guedid*, (D) fish, (E) *douara*, (F) *bouzelouf*, (G) merguez, (H) sugar and hard-boiled eggs, and (I) fermented milk known as *l'ben* (or *ighi* in Berber) or *dehane*.

materials such as semolina, date paste, and water of orange flower [24]. In Algeria, durum semolina is widely used to prepare pancakes, which are consumed during holidays, success celebration, or births. Several names are given to this type of product: *korsa* or *ghraif*. The dish is made of semolina or a blend of semolina with common wheat, salt, eggs, sugar, and dry yeast [23].

3. How couscous is made in the Northeast of Algeria? A case study

To answer to this question, we performed a case study by means of a survey in the Northeast of Algeria as will be detailed in the following.

3.1. Study area and data collection

The present study was conducted in the Northeast of Algeria, including the following localities: Bejaia, Jijel, Constantine, Guelma, Ou m Elbouaghi, Khenchela, and Batna as shown in Fig. 5. The surveyed regions were chosen for access convenience and for their popularity concerning couscous consumption and preparation. For that, a total of 517 homemakers of ethnic couscous were surveyed. All the respondents were women, and this

was however judged reasonable because the native skills of food preparation are mainly passed in the North African countries from mothers to daughters as reported by Gagaoua and Boudchicha [4]. A picture highlighting couscous making by Berber women from the Kabylia region is given in the Fig. 6. The choice of the interviewees was based on the possession of experience in the making, preparation, and consumption of traditional durum wheat couscous.

3.1.1. Questionnaire description

The questionnaire contains 25 items that are both multiple choice and open-ended questions divided into three categories, providing information about the

- i) surveyed homemakers,
- ii) raw materials used to prepare couscous, and
- iii) different steps of traditional couscous making.

The third category was the main subject of the present study as it focuses on the preliminary practices before hydration of wheat semolina including the nature of the liquid hydration, the utensils used, the hydration and rolling/calibration progress, the applied hydrothermal treatments, the drying operation, packaging, storage



Fig. 4. Photographs of *mesfouf* prepared with (A) faba bean and pea or (B) with fruits such as raisins and dates.

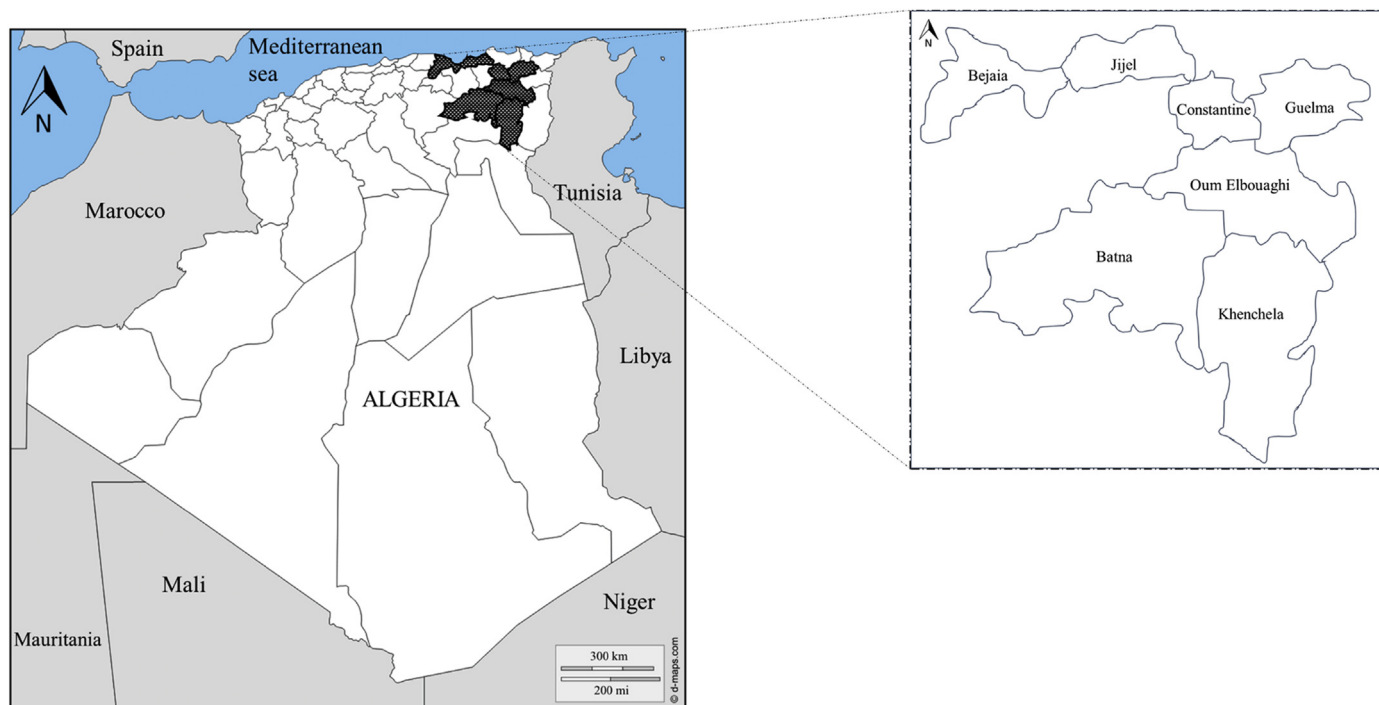


Fig. 5. A map highlighting the surveyed regions from the Northeast of Algeria.

steps, and finally the preparation of couscous dishes and their consumption patterns.

3.1.2. Data analysis

The frequency of responses was computed as the percentage of respondents rounded to the total of surveyed population. The statistical analyses were carried out using the statistical software XLSTAT 2017.19.4 (AddinSoft, Paris, France). The Pearson's Chi-square (χ^2) test was performed to analyze the significance differences between groups of each surveyed variables ($p < 0.05$).

3.2. Results of the survey

3.2.1. Description of the surveyed population

The surveyed population was composed of 517 manufacturers who are responsible of household works and especially traditional



Fig. 6. Berber women (Kabyles) who are streaming and preparing couscous for wedding.

Table 1

Characteristics and sociodemographic structure of the 517 surveyed persons.

Surveyed population	n	%
Age (years)		
23–40	181	35
40–60	259	50
60–78	77	15
Education level		
Illiterate	119	23
Primary/secondary	243	47
University	155	30
Activity		
Active	212	41
Nonactive	305	59

couscous making and preparation (Table 1). The age of the interviewed women varies between 23 and 78 years, but 65 % of them are more than 40 years old (Table 1). Most of the respondents have a secondary or a university education level (77%). The experience in couscous making depends significantly ($p < 0.05$) on the age, education level, and activity outside home of the manufacturers. It was noted that the most experienced persons in couscous making are the ones who are older, nonactive outside the home, which also grouped those with a primary or a secondary education level.

3.2.2. Main traditional preparation steps of couscous

According to the responses of the informants from the Northeast of Algeria, traditional couscous is prepared by different preparation steps, and an overall ethnic preparation diagram has been established (Fig. 7). The main steps and preparation practices of ethnic couscous are presented in the following.

3.2.3. Selection of durum wheat semolina

Semolina used for making couscous should obey some selection criteria (characteristics). Almost all surveyed (97%) refer to the types of semolina to be the primary criterion; they stated that prim quality semolina is the most suitable (Step 1). Other criteria, such as

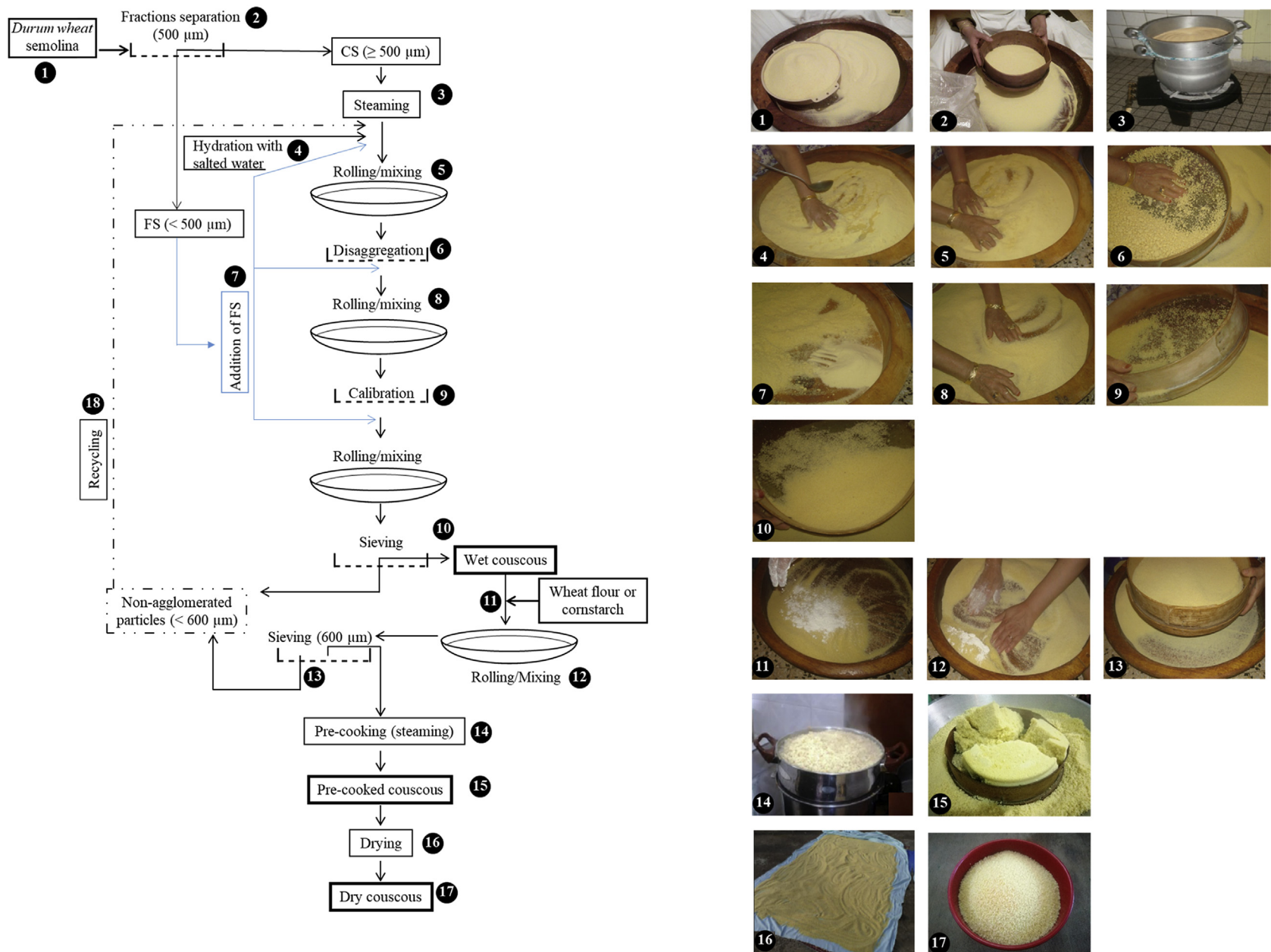


Fig. 7. Overview of the traditional couscous making diagram identified from the survey conducted with 517 persons from the Northeast of Algeria as shown in Fig. 1. This graph highlights the 17 steps of the ethnic preparation diagram of couscous in the Northeast of Algeria detailed in the manuscript. 1) raw material, that is durum wheat semolina; 2) classification of semolina into coarse semolina (CS) and fine semolina (FS); 3) steaming of CS to improve its agglomerative properties; 4) hydration of steamed CS with salted water; 5) rolling and mixing of steamed CS and salted water; 6) breaking down of lumps formed by sieving; 7) addition of FS; 8) rolling and mixing; 9) size calibration; 10) removal of nonagglomerated particles that will be recycled; 11, 12, & 13) finishing of wet couscous grains by adding wheat flour or cornstarch including rolling/mixing and sieving; 14) pre-cooking of finished wet couscous by steaming; 15) final aspect of pre-cooked couscous; 16) drying of pre-cooked couscous by spreading on a clean cover tissue; and 17) final dried couscous ready to prepare meals.

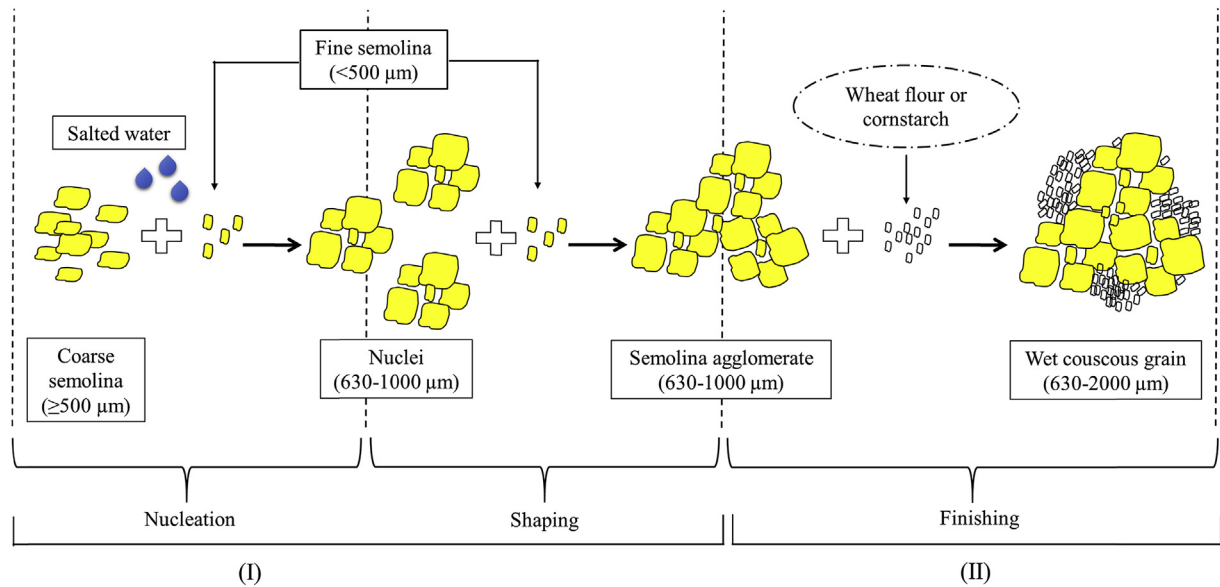


Fig. 8. Schematic representation of the main steps contributing to couscous agglomeration from nucleation and shaping to finishing. I) fine semolina during wet agglomeration of coarse semolina; II) wheat flour and cornstarch to improve shape and texture of couscous grains.

particle size (>90% of responses), color (>70%), and purity (>50%) are further considered.

3.2.4. Preparation and classification of semolina

Before semolina hydration, the physical and hydrothermal operations are performed, involving particle size classification and steaming (steps 2 and 3). The results of the questionnaire highlighted that the classification of semolina into two fractions is carried out by 80% of the respondents by means of 500- μm mesh sieves. Two fractions were obtained: the coarse semolina (CS), which is the retained fraction, and fine semolina (FS), which is the passing fraction. Among the manufacturers, 20% stated that the classification step is not necessary if there is homogeneity in the particle size distribution of the semolina. Subsequently, the CS was precooked with steam for 10–14 minutes. This operation is used to improve the agglomeration properties of semolina by allowing the formation of agglomerates rather than clumps of dough.

3.2.5. Hydration

The hydration of semolina is a delicate step, which is necessary to obtain a homogeneous wetting of the semolina by checking the volume of the added water. Higher amounts of water promote an exaggerated agglomeration, leading to the formation of dough that will make the rolling step very difficult.

From the responses, it seems that salinity of the used water in wet agglomeration could influence the quality of the couscous. Accordingly, 87% of manufacturers hydrated the semolina by a saltwater solution (Step 4). Overall, the concentration of salt (NaCl) in water was estimated to be 1.6%. Their choice was justified on the one hand by the enhancement of the flavor of the final product and on the other hand by assuring better protection against microbiological alterations during storage. Furthermore, it was revealed that when the wetting liquid used is fresh water, the homemakers add the salt to the semolina before its hydration or systematically in the couscous during its preparation for consumption.

3.2.6. Rolling calibration

After collecting and analyzing the data about rolling calibration step, the data showed that this is conducted in three main substeps known as nucleation, shaping, and finishing (Fig. 8).

a. Nucleation. After preparation of the raw material, the CS/FS ratio is established. The rolling operation begins with simultaneous watering and mixing of both semolina fractions. The CS/FS ratio seems to depend on several factors and must be more than one. In contrast to the industrial process, in the traditional couscous making, the two particle size fractions are categorized at the beginning. First, the watering is done gradually with small volumes of saltwater using a ladle (Step 4). Second, the whole is mixed in circular movements by hand fingers half bent to distribute the wetting liquid in the bed powder in a homogeneous way (Step 5). The addition of small quantities of FS allows the initiation of particles agglomeration. Thus, the wetting liquid is absorbed by the fine particles and serves as a center around which the coarse particles adhere, giving rise to small structures known as nuclei (Fig. 8). The presence of fine particles could affect the agglomeration kinetics as recently reported [25]. During wetting, the binder diffuses easily into the fine particles and causes the evolution of protein matrices giving rise to viscous bridges. Moreover, FS may contain a high level of damaged starch which is most responsible for water absorption. Thus, gelatinization can take place, and the agglomeration will be easy [26,27].

b. Shaping. The primary grains, which were formed during the hydration step, grow by the addition of FS (Fig. 8). At this stage, rolling is carried out by applying energetic and circular movements with the palm on the bed particles. The FS particles aggregate to the primary couscous grains (nuclei). This step allows formation of larger agglomerates through a snowball effect and coalescence. According to the earlier reports, the FS adheres against the voids of coarse particles and gives spherical and smooth agglomerates [26–28]. Therefore, the fine particles have the ability to adhere better than the coarse particles.

The respondents highlighted that the step of addition rolling of semolina is carried out two or three times to ensure that it has absorbed all the water hydration. Some of them reported also that this allows a good cohesion between semolina particles. In this substep, the lumps formed are broken down through a mesh sieve of 2860–3300 μm (Step 6) by adding little amounts of FS (Step 7). Subsequently, the under-size fractions will undergo successive rolling for several times (Step 8), before calibration (Step 9). Finally,

the desired size is obtained at this step. A small amount of residual semolina remains not agglomerated and must be separated from the wet couscous grains using a 600- μm mesh sieve (Step 10). The particles that have size less than 600 μm are reused, and those greater than 600 μm undergo a finishing step.

c. Finishing. This substep corresponds to a rolling operation of the wet couscous grains. Thus, rolling is repeated several times with sprinkling of wheat flour or cornstarch without the addition of water (steps 11, 12, and 13). The quantities of wheat flour or cornstarch used were estimated at 10g/100g (wheat flour or cornstarch/wet couscous). According to the interviewed women, the use of wheat flour or cornstarch aims to homogenize and further improve the texture of the couscous grains by giving them a more spherical shape, a smoother surface, and well-individualized grains (Fig. 8).

The nonagglomerated semolina particles were reintroduced at the beginning of the rolling operations (Step 18). The recycling process is repeated until maximum depletion of the raw material. It is worthwhile to note that at a given time, the rolling operation must be stopped. Accordingly, the respondents highlighted that there are some basic criteria to be considered which are based on the formation of smooth and homogeneous grains or the absence of nonagglomerated semolina particles and lumps. The surveyed homemakers stated that it is impossible to obtain the rolling yield of 100%, regardless of the experience, the expertise, and the equipment used. There will always be a fraction of semolina not rolled at the end of the rolling operation, and it is often reused to prepare other traditional dishes.

3.2.7. Steaming

The finished wet couscous is subsequently steamed only once before drying (Step 14). However, some homemakers (23%) prefer drying without carrying out this hydrothermal treatment despite its advantages. The steaming step contributes to the improvement of the digestibility and keeps the shapes of couscous grains by gelatinizing its starch. In addition, precooking avoids sticking between couscous particles and modifies the protein structures by reducing their interactions [29]. Furthermore, this step could ensure the prevention of enzymatic and microbiological alterations. According to the respondents, the end of precooking is mainly evaluated by the (i) appearance of the steam on the surface of couscous, (ii) change of color aspect (which turns to amber yellow), and (iii) tenderizing of the couscous particles. These characteristics are mainly visible after the first 15 minutes of precooking. In addition, the manual lump breaking should be carried out immediately to obtain a good separation of the grains, which allows the precooked couscous to be ready for drying (Step 15).

3.2.8. Drying

The precooked couscous was dried outdoors by spreading on a clean tissue in thin layers (Step 16). Some differences were noted between the manufacturers about the manner and drying time. It seems that drying can be done exclusively under shade, which reduces the exposure of precooked couscous to sunlight and high temperatures. The choice of this method of drying can be explained by the preservation of the nutritional and organoleptic quality of the dried couscous. Meanwhile, some manufacturers suppose that the shade drying takes a long time and that couscous is more exposed to alterations and contaminations. Therefore, sun drying seems to be faster and more effective for a maximum reduction in couscous moisture, but it can lead to browning and reduction in taste. It was also noted that shade and sun drying could be combined, starting with shade drying followed by sun drying. Thus, most of the surveyed homemakers adopt this drying technique. Accordingly, two steps are distinguishable: The first allows the

preservation of couscous qualities, and the second ensures optimum drying. At the end of the drying step, the final product is named “dry couscous”, which is packaged in cloth bags and kept in a dry place and at room temperature. To enhance the shelf life or to improve the organoleptic quality of couscous, homemakers add further ingredients such as black or red pepper and bay leaf to the dried couscous.

3.3. Couscous dish preparation

3.3.1. Rehydration of dry couscous

Data from the survey showed that the preparation of the couscous dish begins with rehydration. The dry couscous is soaked in water for few minutes, followed by draining in a couscous pot. Afterward, the rehydrated couscous is allowed to stand for about 10 minutes, stirred, and dispersed from time to time before the rehydrated couscous is added with the fat. It has been found that several types of fat can be used, such as vegetable oil.

3.3.2. Cooking of rehydrated couscous

After rehydration, the couscous is immediately drained and allowed to stand for approximately 8–10 minutes to allow the grains to absorb water more efficiently, and then it is stirred and dispersed. The hydrated couscous is put in the couscous pot that is placed on a pot containing the soup being cooked.

Several criteria have been listed to stop cooking. The rise of the vapor is noted by 49% of the respondents, followed by the development of the bright yellow color (35%). Other criteria were also reported such as an increase in the volume and tenderness of cooked couscous grains.

Subsequently, the couscous is crumbled and watered with little amount of water. Several types of fat can be added; we can find vegetable oil (54%), margarine (39%), melted butter (35%), and olive oil (9%). The choice of the added fats is based on their availability and consumption at family events. It has been noted that melted butter (*dehane*) is the most preferred when preparing couscous to be served during celebrations. Then, the couscous is cooked for the first time without the addition of fat, followed by second cooking after 15 minutes. However, some homemakers mentioned that they cooked it for another third time (11%).

4. Conclusion

Traditional couscous making is a very complex practice despite the simplicity of the raw materials. From semolina to dry couscous, there are several preparation steps, and each one characterizes the involved method to a given region. The results of this survey study allowed us to identify the different steps of traditional couscous making in the Northeast of Algeria. During the preparation, couscous can be distinguished into three aspects: wet, precooked, and dry couscous. In most Algerian localities, there could be no events, feasts, and occasions without the preparation a couscous-based dish. The couscous has an important place as a favorite dish among the Algerian families in different occasions such as the weekends (especially Fridays as it is the weekend), different festivals (marriage and circumcision), public holidays, religious feasts (*Eid al-Fitr*, *Eid al-Adha*, etc.), family gatherings, invites, and funerals.

Conflicts of interest

The authors have no conflicts of interest.

Acknowledgments

The authors would like to greatly acknowledge all the persons and informants who participated in this study namely the following students from INATAA institute: Alaeddine OKKI, Abdelkarim BENSID, Ibrahim GHENNAM, Oualid ADEL, Fahem MOUSSAOUI, Selma BOUDJADA, Meryem KEHAL, Ahlam BENDJEDOU, Djahira CHENINA, Rahma GATER.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data related to this article can be found at <https://doi.org/10.1016/j.jef.2018.08.002>.

References

- [1] Aboubacar A and Hamaker BR. Low molecular weight soluble starch and its relationship with sorghum couscous stickiness. *J Cereal Sci* 2000;31(2): 119–26.
- [2] Béji-Bécheur A, Ourahmoune N and Özçağlar-Toulouse N. The polysemic meanings of couscous consumption in France. *J Consum Behav* 2014;13(3): 196–203.
- [3] Rahmani N and Muller HG. The fate of thiamin and riboflavin during the preparation of couscous. *Food Chem* 1996;55(1):23–7.
- [4] Gagaoua M and Boudechicha H-R. Ethnic meat products of the North African and Mediterranean countries: an overview. *J Ethnic Foods* 2018;5(2):83–98.
- [5] Ounane G, Cuq B, Abecassis J, Yesli A and Ounane SM. Effects of physico-chemical characteristics and lipid distribution in Algerian durum wheat semolinas on the technological quality of couscous. *Cereal Chem* 2006;83(4): 377–84.
- [6] Barboff M. Wheat couscous and cornmeal in Portugal. In: *Couscous, boulgour and polenta: transform and consume cereals in the world*; 2010. p. 47.
- [7] Beji-Becheur A and Ozcaglar-Toulouse N. Couscous connection: the story of a migrant dish. 13th Marketing Research Days of Bourgogne. 2008. p. 17.
- [8] Doukani K. Comparative study between industrial couscous and acorn-based couscous. *Nature Technol* 2015;(13):2.
- [9] Guezlane L, Selselet-Attou G and Senator A. Comparative study of industrial and artisanal couscous. *Cereal Ind* 1986;43:25–9.
- [10] Guezlane L and Senator A. Physicochemical and technological study of two types of couscous (artisanal and industrial). *Ann Inst Natl Agron El Harrach Alger* 1985;5(1):47–62.
- [11] Debbouz A. Process effect on couscous quality. *Am Assoc Cereal Chem* 1996;73(6):668–71.
- [12] Guezlane L. Methods for assessing the culinary quality of durum couscous. *Food Agric Ind* 1991;108(11):966–71.
- [13] Yettou NN, Ait Kaci M, Guezlane L and Ait-Amar H. Determination of the viscoelastic characteristics of cooked couscous using the Chopin viscoelastograph. *Food Agric Ind* 1997;114(12):844–7.
- [14] Gobert E. Uses and food rites of Tunisians, their domestic, physiological and social aspect. Tunis: IBLA Library Editions; 1940.
- [15] Samrakandi H. Eating in the Maghreb: a multidisciplinary approach to table practices in the Mediterranean from the Middle Ages to today. Mirail Presses Univ; 2006.
- [16] Hubert A. Cross-cultural destinies. Thousand and one mouths. *Kitchens and cultural identities*. Paris. 1995. p. 114–8.
- [17] Merabti R, Bekhouche F, Chuat V, Madec MN, Maillard MB, Bailly S, Thierry A and Valence F. A large diversity of lactic acid bacteria species is involved in the fermentation of wheat used for the manufacture of lemzeiet. *Eur Food Res Technol* 2015;241:137–49.
- [18] Bekhouche F, Merabti R and Bailly J. Lemzeiet traditional couscous manufacture from fermented wheat (Algeria): investigation of the process and estimation of the technological and nutritional quality. *Afr J Sci Technol* 2013;4(8):167–75.
- [19] Oktay S and Sadıkoğlu S. The gastronomic cultures' impact on the African cuisine. *J Ethnic Foods* 2018;5(2):140–6.
- [20] Hamama A and Bayi M. Composition and microbiological profile of two Moroccan traditional dairy products: raib and jben. *Int J Dairy Technol* 1991;44(4):118–20.
- [21] Bayram M. An analysis of Scorched Immature wheat: Frekeh. *Cereal Foods World* 2008;53(3):134–8.
- [22] Kezih R, Bekhouche F and Merazka A. Some traditional Algerian products from durum wheat. *Afr J Food Sci* 2014;8(1):30–4.
- [23] Boggini G, Namoune H, Abecassis J and Cuq B. CHAPTER 10 – other traditional durum-derived products. In: *Sissons M, et al., editors. Durum wheat*. 2nd ed. AACC International Press; 2012. p. 177–99.
- [24] Ouelhi G, Namoune H and Messad N. The traditional cake (makroud) in the Constantine city. In: *The 4th scientific conference of agricultural sciences, Assiut, Egypt*; 2004.
- [25] Murrieta-Pazos I, Galet L, Patry S, Gaiani C and Scher J. Evolution of particle structure during water sorption observed on different size fractions of durum wheat semolina. *Powder Technol* 2014;255:66–73.
- [26] Galiba M, Waniska RD, Rooney LW and Miller FR. Couscous quality of sorghum with different kernel characteristics. *J Cereal Sci* 1988;7(2):183–93.
- [27] Saad MM, Gaiani C, Scher J, Cuq B, Ehrhardt JJ and Desobry S. Impact of re-grinding on hydration properties and surface composition of wheat flour. *J Cereal Sci* 2009;49(1):134–40.
- [28] Barkouti A, Delalonde M, Rondet E and Ruiz T. Structuration of wheat powder by wet agglomeration: case of size association mechanism. *Powder Technol* 2014;252:8–13.
- [29] Guezlane L, Abecassis J and Morel M. Effet des traitements hydrothermiques du couscous de blé dur sur le comportement des protéines. *Ann Inst Natl Agron El Harrach Alger* 1998;19(1):72–81.

Annexe 1. Questionnaire de la fabrication, de la préparation et de consommation du couscous artisanal

I. Identité de la personne enquêtée

1. Fonction :
2. Age :
3. Nombre de personnes résidant sous le même toit :
4. Expérience requise dans la fabrication du couscous :
5. Expérience requise dans la préparation exclusive du couscous :

II. Données générales

1. Quelle est la quantité de la semoule que vous achetez (par mois/par année) ?
 - 10 kg :
 - 25 kg :
 - 50 kg :
 - 75 kg :
 - 100 kg :
2. Que faites-vous avec cette semoule ?
3. Préparez-vous le couscous à la maison ?
 - Oui :
 - Non :
4. Préparez-vous le couscous avec des semoules et farines autres que la semoule de blé dur ?
 - Oui :
 - Non :

5. Si oui, pourquoi vous les utilisez ? citez-les.

- .
- .
- .
- .

6. Quelle est la proportion de la semoule réservée à la fabrication du couscous ?

10 kg :

25 kg :

50 kg :

75 kg :

100 kg :

7. Combien de fois fabriquez-vous le couscous ?

Par trimestre :

Par semestre :

Par année :

8. Qui fabrique le couscous ?

- La mère
- La grande mère
- La fille
- La tante

9. Quelle est la fréquence de consommation du couscous ?

- Chaque jour
- Deux fois par semaine
- Une fois par semaine
- Une fois par mois

III. Technologie de la fabrication du couscous

10. Quelle est la qualité de la semoule utilisée pour la fabrication du couscous ?

Semoule supérieure :

Semoule courante (ordinaire) :

11. Quels sont les critères de choix de la semoule destinée à la fabrication du couscous :

-
-
-
-

12. Décrivez les différentes phases de la fabrication du couscous ?

-
-
-
-

13. L'eau d'hydratation utilisée dans l'opération du roulage est :

Salée :

Non salée :

14. Quels tamis utilisez-vous lors de la fabrication du couscous ?

15. Quel est le rendement du roulage ?

16. Recyclez-vous la semoule non roulée ?

Oui :

Non :

17. Quelle est la destinée des coproduits ?

18. Sur quels critères vous vous basez pour arrêter l'opération du roulage ?
19. Après roulage du couscous, le précuisez-vous avant séchage ? si oui, combien de fois ?
20. Comment estimez-vous la fin de la précuisson ?
21. Vous séchez le couscous :
- Au soleil :
 - À l'ombre :
 - Au soleil puis à l'ombre :
 - A l'ombre puis au soleil :
22. Sur quels critères vous vous basez pour arrêter le séchage ?
23. Pendant combien de temps le séchez-vous ?
- 24 heures :
 - 48 heures :
 - 72 heures :
 - Autres :
24. Tamisez-vous le couscous après séchage :
- Oui :
 - Non :
25. Dans quel but vous faites cette opération ?
26. Quels sont les conditions du stockage du couscous sec ?
- Emballage :
 - Endroit :
 - Produits ajoutés au couscous pendant le stockage :
27. Pour combien de temps vous stockez le couscous sec ?

IV. Préparation et consommation du couscous

28. Quelle quantité du couscous achetez-vous par :

Jour :

Semaine :

Mois :

Année :

29. L'immersion du couscous sec dans l'eau se fait :

Avec addition de la matière grasse :

Sans addition de la matière grasse :

30. Combien de fois cuisez-vous le couscous ?

31. Comment estimer la fin de la cuisson ?

32. Arrosez-vous le couscous pendant la cuisson ? si oui :

Après la 1^{ère} cuisson :

Après la 2^{ème} cuisson :

33. L'addition de la matière grasse se fait :

Après la 1^{ère} cuisson :

Après la 2^{ème} cuisson :

34. Quels types de matière grasse ajoutez-vous :

Beurre :

Margarine :

Huile d'olive :

Huile de table (tournesol, soja, etc.) :

35. Quels sont les différents modes de consommation du couscous ?

Avec la soupe de légumes :

Avec le lait (*Masfouf*) :

Autres :

36. Quels légumes utilisez-vous pour la préparation de la soupe ?

37. Quelles viandes utilisez-vous pour la préparation de la soupe ?

38. Ajoutez-vous la matière grasse à la soupe :

Oui :

Non :

39. Comment apprécier la qualité du couscous pendant la consommation ?

40. A quelles occasions consommez-vous le couscous ?

Annexe 2. Bulletin du test de classement par rang

FICHE DE TEST DE CLASSEMENT

NOM :

PRENOM :

DATE :

-Veuillez classer les cinq échantillons de couscous par ordre de préférence.

Code

Classement

Annexe 3. Différences des sommes de classement par rang absolu critiques pour les comparaisons de «tous les traitements» à un seuil de signification de 1 %

Dégustateurs	Nombre d'échantillons									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	6	8	11	13	15	18	20	23	25	28
4	7	10	13	15	18	21	24	27	30	33
5	8	11	14	17	21	24	27	30	34	37
6	9	12	15	19	22	26	30	34	37	42
7	10	13	17	20	24	28	32	36	40	44
8	10	14	18	22	26	30	34	39	43	47
9	10	15	19	23	27	32	36	41	46	50
10	11	15	20	24	29	34	38	43	48	53
11	11	16	21	26	30	35	40	45	51	56
12	12	17	22	27	32	37	42	48	53	58
13	12	18	23	28	33	39	44	50	55	61
14	13	18	24	29	34	40	46	52	57	63
15	13	19	24	30	36	42	47	53	59	65
16	14	19	25	31	37	42	49	55	61	67
17	14	20	26	32	38	44	50	56	63	69
18	15	20	26	32	39	45	51	58	65	71
19	15	21	27	33	40	46	53	60	66	73
20	15	21	28	34	41	47	54	61	68	75
21	16	22	28	35	42	49	56	63	70	77
22	16	22	29	36	43	50	57	64	71	79
23	16	23	30	37	44	51	58	65	73	80
24	17	23	30	37	45	52	59	67	74	82
25	17	24	31	38	46	53	61	68	76	84
26	17	24	32	39	46	54	62	70	77	85
27	18	25	32	40	47	55	63	71	79	87
28	18	25	33	40	48	56	64	72	80	89
29	18	26	33	41	49	57	65	73	82	90
30	19	26	34	42	50	58	66	75	83	92
31	19	27	34	42	51	59	67	76	85	93
32	19	27	35	43	51	60	68	77	86	95
33	20	27	36	44	52	61	70	78	87	96
34	20	28	36	44	53	62	71	79	89	98
35	20	28	37	45	54	63	72	81	90	99
36	20	29	37	46	55	63	73	82	91	100
37	21	29	38	46	55	64	74	83	92	102
38	21	29	38	47	56	65	75	84	94	103
39	21	30	39	48	57	66	76	85	95	105
40	21	30	39	48	57	67	76	86	96	106
41	22	31	40	49	58	68	77	87	97	107
42	22	31	40	49	59	69	78	88	98	109
43	22	31	41	50	60	69	79	89	99	110
44	22	32	41	51	60	70	80	90	101	111
45	23	32	41	51	61	71	81	91	102	112
46	23	32	42	52	62	72	82	92	103	114
47	23	33	42	52	62	72	83	93	104	115
48	23	33	43	53	63	73	84	94	105	116
49	24	33	43	53	64	74	85	95	106	117
50	24	34	44	54	64	75	85	96	107	118
55	25	35	46	56	67	78	90	101	112	124
60	26	37	48	59	70	82	94	105	117	130
65	27	38	50	61	73	85	97	110	122	135
70	28	40	52	64	76	88	101	114	127	140
75	29	41	53	66	79	91	105	118	131	145
80	30	42	55	68	81	94	108	122	136	150
85	31	44	57	70	84	97	111	125	140	154
90	32	45	58	72	86	100	114	129	144	159
95	33	46	60	74	88	103	118	133	148	163
100	34	47	61	76	91	105	121	136	151	167

Annexe 4. Bulletin pour le test hédonique avec un barème de notation allant de 1 à 10**FICHE DE TEST HEDONIQUE**

NOM :

PRENOM :

DATE :

Veillez examiner et goûter chaque échantillon de couscous, et donnez une note de 1 à 10 selon l'intensité du caractère.

	A	B	C	D	E
La fermeté					
Le collant					
La couleur					
L'odeur					
L'acceptabilité globale					

REMARQUE :

Si l'attribut mentionné dans la fiche n'est pas détecté dans le produit, vous mettez 0. La note doit être attribuée en fonction de l'intensité de l'attribut.

Annexe 5. Corrélations entre les variables et les facteurs de l'ACP montrant l'effet de la FBT

	F1	F2
Taux de FBT	0,857	0,475
L/S	-0,202	0,958
CP	0,605	-0,793
H %	-0,242	0,951
Rdt	-0,607	0,201
d ₅₀	0,674	0,636
FP	0,985	0,010
ρ _a	0,930	0,214
ρ _t	0,982	-0,019

Annexe 6. Matrice de corrélation de Pearson (n) entre le taux d'ajout de la farine de blé tendre (FBT) sur les propriétés d'hydratation (L/S : ratio d'hydratation et CP : couple de torsion) et les caractéristiques des agglomérats humides (H % : teneur en eau, Rdt : rendement d'agglomération, d_{50} : diamètre médian, FP : fraction pâteuse, ρ_a : densité aérée et ρ_t : densité tassée)

Variables	Taux de FBT	L/S	CP	H %	Rdt	d_{50}	FP	ρ_a	ρ_t
Taux de FBT	1,00	0,30	0,15	0,26	-0,51	0,83	0,86	0,87	0,80
L/S		1,00	-0,88	0,99	0,18	0,40	-0,16	-0,02	-0,24
CP			1,00	-0,91	-0,50	-0,10	0,58	0,41	0,61
H %				1,00	0,21	0,38	-0,21	-0,07	-0,28
Rdt					1,00	-0,04	-0,71	-0,31	-0,49
d_{50}						1,00	0,63	0,83	0,69
FP							1,00	0,87	0,95
ρ_a								1,00	0,95
ρ_t									1,00

Annexe 7. Corrélations entre les variables et les facteurs de l'ACP montrant l'effet du sel

	F1	F2
Taux de		
NaCl	-0,667	-0,534
L/S	-0,862	0,477
CP	0,836	-0,515
H %	-0,214	0,946
Rdt	0,560	0,349
d50	0,954	0,139
FP	0,003	0,748
pa	0,988	0,086
pt	0,947	0,289

Annexe 8. Matrice de corrélation de Pearson (n) entre la concentration du sel dans l'eau d'hydratation sur les propriétés d'hydratation (L/S : ratio d'hydratation et CP : couple de torsion) et les caractéristiques des agglomérats humides (H % : teneur en eau, Rdt : rendement d'agglomération, d_{50} : diamètre médian, FP : fraction pâteuse, ρ_a : densité aérée et ρ_t : densité tassée)

Variables	Concentration en sel	L/S	CP	H %	Rdt	d_{50}	FP	ρ_a	ρ_t
Taux de NaCl	1,00	0,31	-0,31	-0,29	-0,39	-0,68	-0,42	-0,65	-0,75
L/S		1,00	-0,98	0,66	-0,25	-0,74	0,25	-0,82	-0,69
CP			1,00	-0,70	0,23	0,69	-0,29	0,78	0,64
H %				1,00	0,33	-0,04	0,58	-0,12	0,07
Rdt					1,00	0,55	-0,09	0,59	0,58
d_{50}						1,00	0,04	0,96	0,96
FP							1,00	0,08	0,25
ρ_a								1,00	0,97
ρ_t									1,00

Annexe 9. Corrélations entre les variables et les facteurs F1 et F2 de l'ACP pour les agglomérats humides sans gluten

	F1	F2
Pr	-0,230	0,959
Am	0,262	-0,944
Li	-0,668	0,682
Fi	-0,468	0,781
Cdr	0,861	0,226
H %	0,757	-0,325
pa-f	0,959	0,189
pt-f	0,909	0,259
ρ	0,198	-0,959
RD	0,874	0,373
ϵ_a	-0,939	-0,279
ϵ_t	-0,894	-0,300
AT	-0,293	0,043
Ec	0,815	0,116
CI	-0,913	0,136
IH	-0,905	0,157
d50-f	0,849	0,252
DG	-0,738	0,474
L/Sop	0,587	-0,195
CT	-0,580	0,342
H %-AH	0,355	0,878
Rdt A	0,368	0,927
d50-AH	0,205	0,963
FP	-0,642	0,640
pa-AH	0,221	0,955
pt-AH	0,251	0,954

Annexe10. Matrice des corrélations entre les caractéristiques des agglomérats humides sans gluten et celles de leurs matières premières

Variables	Pr	Am	Li	Fi	Cdr	H %	pa-f	pt-f	ρ	RD	εa	εt	AT	Ec	CI	IH	d ₅₀ -f	DG	L/Sop	CT	H %-AH	Rdt A	d ₅₀ -AH	FP	pa-AH	pt-AH
Pr	1,00	-0,99	0,82	0,89	0,03	-0,40	-0,03	0,06	-0,98	0,18	-0,07	-0,09	0,26	-0,14	0,36	0,39	0,02	0,56	-0,41	0,37	0,73	0,81	0,89	0,74	0,85	0,84
Am		1,00	-0,86	-0,93	-0,01	0,44	0,08	0,00	0,99	-0,12	0,01	0,02	-0,24	0,12	-0,38	-0,41	-0,04	-0,56	0,37	-0,38	-0,73	-0,79	-0,85	-0,71	-0,81	-0,81
Li			1,00	0,96	-0,43	-0,76	-0,56	-0,48	-0,83	-0,38	0,48	0,47	0,21	-0,37	0,72	0,74	-0,29	0,72	-0,41	0,53	0,42	0,41	0,48	0,75	0,46	0,44
Fi				1,00	-0,18	-0,59	-0,36	-0,30	-0,91	-0,19	0,27	0,29	0,23	-0,21	0,52	0,55	-0,07	0,58	-0,34	0,43	0,57	0,58	0,62	0,63	0,56	0,56
Cdr					1,00	0,68	0,86	0,77	-0,11	0,78	-0,86	-0,78	-0,16	0,64	-0,91	-0,90	0,81	-0,46	0,33	-0,25	0,44	0,52	0,42	-0,46	0,36	0,40
H %						1,00	0,74	0,70	0,43	0,64	-0,70	-0,65	0,29	0,29	-0,72	-0,71	0,39	-0,82	0,09	-0,73	-0,17	-0,03	-0,08	-0,69	-0,18	-0,14
pa-f							1,00	0,98	0,03	0,97	-1,00	-0,98	-0,14	0,70	-0,82	-0,81	0,76	-0,62	0,39	-0,54	0,45	0,52	0,41	-0,43	0,41	0,44
pt-f								1,00	-0,03	0,99	-0,99	-0,99	-0,07	0,64	-0,71	-0,70	0,70	-0,58	0,32	-0,57	0,49	0,56	0,47	-0,33	0,48	0,51
ρ									1,00	-0,15	0,06	0,06	-0,15	0,04	-0,27	-0,30	-0,13	-0,56	0,31	-0,44	-0,78	-0,83	-0,88	-0,66	-0,83	-0,83
RD										1,00	-0,98	-0,99	-0,05	0,63	-0,67	-0,66	0,70	-0,51	0,28	-0,51	0,58	0,66	0,58	-0,24	0,58	0,60
εa											1,00	0,98	0,13	-0,69	0,79	0,78	-0,77	0,57	-0,36	0,50	-0,52	-0,59	-0,49	0,37	-0,49	-0,52
εt												1,00	0,13	-0,64	0,71	0,70	-0,69	0,50	-0,32	0,48	-0,52	-0,59	-0,51	0,26	-0,53	-0,55
AT													1,00	-0,69	0,37	0,40	-0,51	-0,03	-0,84	-0,26	-0,30	-0,07	0,10	0,20	-0,09	-0,08
Ec														1,00	-0,73	-0,73	0,95	-0,53	0,90	-0,34	0,57	0,43	0,18	-0,55	0,28	0,30
CI															1,00	1,00	-0,79	0,62	-0,56	0,34	-0,19	-0,20	-0,06	0,70	-0,06	-0,09
IH																1,00	-0,78	0,61	-0,57	0,32	-0,17	-0,18	-0,04	0,69	-0,04	-0,07
d ₅₀ -f																	1,00	-0,53	0,75	-0,33	0,65	0,57	0,35	-0,54	0,38	0,41
DG																		1,00	-0,48	0,92	0,14	0,14	0,31	0,89	0,35	0,31
L/Sop																			1,00	-0,27	0,28	0,06	-0,20	-0,61	-0,06	-0,05
CT																				1,00	0,10	0,08	0,20	0,67	0,24	0,21
H %-AH																					1,00	0,96	0,86	0,27	0,91	0,92
Rdt A																						1,00	0,96	0,33	0,95	0,97
d ₅₀ -AH																							1,00	0,52	0,97	0,98
FP																								1,00	0,55	0,52
pa-AH																									1,00	1,00
pt-AH																										1,00

*Annexe II. Corrélations entre les variables et les facteurs F1 et F2 de l'ACP pour les
couscous sec sans gluten*

	F1	F2
Pr	0,750	0,653
Am	-0,717	-0,688
Li	0,303	0,934
Fi	0,464	0,832
Cdr	0,547	-0,634
H %	0,022	-0,741
pa-f	0,597	-0,761
pt-f	0,647	-0,685
ρ	-0,753	-0,629
RD	0,732	-0,601
εa	-0,667	0,700
εt	-0,682	0,677
AT	-0,116	0,399
Ec	0,462	-0,667
CI	-0,258	0,872
IH	-0,239	0,884
d50-f	0,578	-0,599
DG	0,113	0,756
L/Sop	0,092	-0,624
CT	0,048	0,544
HR-C	0,984	0,143
Rdt-C	0,825	-0,109
d50-C	0,927	0,328
pa-C	0,955	0,287
pt-C	0,957	0,282
IH-C	0,962	0,267
IC-C	0,966	0,225
G-25 °C	0,366	0,661
G-95 °C	0,592	0,591
DD	0,163	0,695
TCmin	0,857	-0,214
TCopt	0,831	-0,382
TCmax	0,823	-0,307
IGM	0,818	-0,412
IGV	0,828	-0,332
Cl	0,601	0,609
Od	0,820	0,479
Co	0,468	0,721
Fe	0,982	-0,008
AG	0,888	-0,245

Annexe 12. Matrice des corrélations entre les caractéristiques des couscous secs sans gluten et celles de leurs matières premières

Variables	Pr	Am	Li	Fi	Cdr	H %	pa-f	pt-f	ρ	RD	εa	εt	AT	Ec	CI	IH	d50-f	DG	L/Sop
L/Sop	-0,41	0,37	-0,41	-0,34	0,33	0,09	0,39	0,32	0,31	0,28	-0,36	-0,32	-0,84	0,90	-0,56	-0,57	0,75	-0,48	1,00
CT	0,37	-0,38	0,53	0,43	-0,25	-0,73	-0,54	-0,57	-0,44	-0,51	0,50	0,48	-0,26	-0,34	0,34	0,32	-0,33	0,92	-0,27
HR-C	0,83	-0,81	0,44	0,61	0,49	-0,07	0,48	0,53	-0,85	0,63	-0,56	-0,56	-0,06	0,40	-0,16	-0,14	0,54	0,18	0,04
Rdt-C	0,59	-0,56	0,10	0,31	0,79	0,34	0,64	0,63	-0,63	0,70	-0,70	-0,66	0,12	0,29	-0,49	-0,47	0,52	0,03	-0,13
d ₅₀ -C	0,91	-0,88	0,56	0,65	0,23	-0,24	0,31	0,40	-0,87	0,50	-0,39	-0,44	0,05	0,14	0,11	0,13	0,25	0,39	-0,18
pa-C	0,90	-0,88	0,56	0,67	0,32	-0,24	0,33	0,40	-0,90	0,51	-0,42	-0,45	-0,05	0,26	0,01	0,03	0,37	0,37	-0,07
pt-C	0,90	-0,88	0,56	0,68	0,32	-0,24	0,34	0,41	-0,90	0,51	-0,42	-0,45	-0,06	0,27	0,01	0,03	0,39	0,35	-0,05
IH-C	0,89	-0,87	0,55	0,67	0,37	-0,20	0,36	0,42	-0,90	0,53	-0,45	-0,46	-0,04	0,28	-0,03	-0,01	0,41	0,33	-0,06
IC-C	0,87	-0,85	0,53	0,67	0,40	-0,17	0,40	0,45	-0,88	0,56	-0,48	-0,48	-0,07	0,36	-0,07	-0,05	0,49	0,24	0,03
G-25 °C	0,75	-0,78	0,73	0,84	0,01	-0,11	-0,15	-0,10	-0,74	-0,01	0,08	0,14	0,63	-0,28	0,36	0,40	-0,04	0,19	-0,50
G-95 °C	0,87	-0,89	0,72	0,85	0,16	-0,10	0,02	0,08	-0,86	0,19	-0,10	-0,06	0,55	-0,17	0,25	0,29	0,07	0,24	-0,47
DD	0,62	-0,67	0,71	0,80	-0,09	-0,14	-0,30	-0,27	-0,63	-0,19	0,24	0,32	0,65	-0,36	0,41	0,45	-0,14	0,18	-0,51
TCmin	0,47	-0,42	0,07	0,14	0,42	-0,10	0,58	0,62	-0,47	0,67	-0,62	-0,69	-0,49	0,57	-0,30	-0,31	0,54	0,16	0,34
TCopt	0,34	-0,30	-0,07	0,04	0,54	0,04	0,70	0,72	-0,35	0,75	-0,73	-0,77	-0,57	0,75	-0,47	-0,47	0,72	-0,06	0,52
TCmax	0,39	-0,33	-0,05	0,04	0,50	-0,01	0,63	0,66	-0,39	0,70	-0,67	-0,73	-0,50	0,56	-0,40	-0,41	0,54	0,14	0,32
IGM	0,33	-0,27	-0,16	-0,06	0,50	0,23	0,78	0,85	-0,28	0,87	-0,81	-0,88	-0,29	0,59	-0,41	-0,41	0,57	-0,15	0,31
IGV	0,39	-0,32	-0,08	0,00	0,43	0,15	0,73	0,80	-0,33	0,83	-0,75	-0,84	-0,28	0,55	-0,32	-0,32	0,52	-0,09	0,28
Cl	0,82	-0,80	0,74	0,68	-0,34	-0,61	-0,14	-0,01	-0,74	0,08	0,07	-0,03	0,05	-0,15	0,58	0,59	-0,17	0,60	-0,27
Od	0,90	-0,89	0,71	0,75	-0,02	-0,48	0,08	0,19	-0,87	0,29	-0,17	-0,23	-0,05	0,12	0,32	0,33	0,16	0,48	-0,10
Co	0,82	-0,87	0,87	0,94	-0,14	-0,42	-0,23	-0,15	-0,83	-0,05	0,15	0,18	0,31	-0,09	0,47	0,51	0,05	0,30	-0,24
Fe	0,73	-0,69	0,27	0,41	0,53	-0,01	0,58	0,62	-0,73	0,71	-0,64	-0,68	-0,15	0,40	-0,25	-0,24	0,50	0,22	0,04
AG	0,53	-0,48	0,00	0,19	0,80	0,30	0,74	0,73	-0,56	0,79	-0,79	-0,78	-0,09	0,43	-0,55	-0,54	0,60	0,02	0,03

Résumés

Résumé

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier certaines conditions de fabrication du couscous artisanal. Pour répondre à cet objectif, le dispositif d'étude s'articule autour de deux parties principales ; la réalisation d'une enquête dans la région Nord-Est de l'Algérie sur la fabrication, la préparation et la consommation du couscous artisanal et l'étude de trois pratiques identifiées lors de l'enquête à savoir l'ajout de la farine de blé tendre à la semoule de blé dur et à la farine d'orge, l'ajout du sel dans l'eau d'hydratation et l'agglomération humides des farines sans gluten (farines de maïs, d'amarante, de sarrasin, de quinoa et de manioc). Les propriétés rhéologiques pendant l'agglomération humide ont été analysées par suivi du couple de torsion dans le granulateur MTR-Caleva[®] et la granulation humide a été conduite dans le granulateur Mi-Pro[®]. Ensuite, les agglomérats obtenus ont été caractérisés. Après l'étude de la granulabilité des farines sans gluten à l'échelle de granulateur, des essais de roulage de ces farines ont été réalisés suivant le mode artisanal. Les données recueillies à travers l'enquête nous ont permis de dresser un diagramme détaillé de fabrication artisanale du couscous et plusieurs pratiques ont été énumérées comme opérations clés pouvant largement influencer la qualité du couscous. Parmi ces pratiques, (i) la précuisson de la fraction grosse de la semoule, (ii) l'utilisation de l'eau salée comme un liquide d'hydratation, (iii) l'addition de la farine de blé tendre ou de l'amidon de maïs pendant l'étape de finition, (iv) le séchage combiné à l'ombre puis au soleil. L'ajout de FBT à la SBD et à la FO présente des profils rhéologiques accentuant l'effet cohésif-adhésif inter-granules. Le taux optimal du liquide (pour une cohésion maximale développée) dépend des effets étudiés : rapport L/S optimal tend à baisser avec la salinité et à augmenter après addition de la FBT. La salinité du liquide d'hydratation diminue la cohésion inter-granulaire lors du mélange solide-liquide (effet sur la tension de surface liquide et la mouillabilité des solides) et a comme résultat la production d'agglomérats moins denses, de tailles étalées. Les essais de granulation des farines sans gluten ont démontré la faisabilité technologique de leur transformation en grains de couscous que ce soit à l'échelle laboratoire ou à l'échelle artisanale sauf la farine de manioc qui ne s'agglomère pas sous l'effet de l'hydratation et du roulage. Les analyses sensorielles ont montré que les couscous sans gluten fabriqués ont des scores acceptables pour tous les attributs organoleptiques sauf le couscous d'amarante qui a été classé en dernière position à cause de son caractère très collant et de sa texture moins ferme.

Mots clé. Enquête, couscous artisanal, agglomération humide, semoule de blé dur, farine d'orge, farines sans gluten.

Abstract

The objective of this thesis is to study some conditions of manufacture of traditional couscous. To meet this objective, the study is organized around two main parts; a survey in the Northeast region of Algeria on the manufacture, preparation and consumption of artisanal couscous and the study of three practices identified during the survey (study of the effect of the addition of flour soft wheat with durum wheat semolina and barley flour, the addition of salt in the moist water of hydration and the agglomeration of gluten-free flours (corn, amaranth and buckwheat flours, quinoa and cassava)). Rheological properties during wet agglomeration were analyzed by the evolution of mean torque under water addition and shearing conditions using a Caleva® mixer torque rheometer. Mi-Pro® high shear granulator has been used to produce wet agglomerates, which were characterized by fraction distribution, water content, density, and agglomeration yield. After studying the granulability of gluten-free flours on the granulator scale, rolling tests of these flours were carried out according to the artisanal procedure. The data collected through the survey allowed us to design a traditional couscous-making diagram and several practices were listed as key operations that could greatly influence the quality of couscous. Among these practices, (i) the pre-cooking of the coarse semolina, (ii) the use of salted water as a hydration liquid, (iii) the addition of wheat flour or cornstarch during the finishing step, (iv) combined drying with shade and sun. The addition of wheat flour (WF) to wheat semolina (WS) and barley flour (FO) presents rheological profiles accentuating the cohesive-adhesive inter-granule effect. The optimum rate of the liquid (for maximum cohesion developed) depends on the studied effects: optimal ratio L/S tends to decrease with the salinity and to increase after addition of the FBT. The salinity of the hydration liquid decreases the inter-granular cohesion during solid-liquid mixing (effect on the liquid surface tension and the wettability of the solids) and results in the production of less dense agglomerates of large sizes. The granulation tests of gluten-free flours have demonstrated the technological feasibility of their transformation into couscous grains either at the laboratory scale or at the artisanal scale, except for cassava flour, which does not agglomerate under water addition and shearing conditions. Sensory analysis have shown that manufactured gluten-free couscous have acceptable scores for all organoleptic attributes except for amaranth couscous which has been ranked last due its very sticky nature and less firm texture.

Keywords. Survey, traditional couscous, wet agglomeration, durum wheat semolina, barley flour, gluten-free flours.

المخلص

الهدف من هذا البحث هو دراسة بعض شروط صنع الكسكس التقليدي. لتحقيق هذا الهدف، تم تنظيم الدراسة حول قسمين رئيسيين؛ أولاً إجراء دراسة عن طريق الاستبيان في المنطقة الشمالية الشرقية من الجزائر حول إنتاج، إعداد واستهلاك الكسكس التقليدي وثانياً دراسة ثلاث ممارسات تم تحديدها خلال الاستبيان والتي تتمثل في دراسة تأثير إضافة دقيق القمح اللين إلى سميد القمح الصلب ودقيق الشعير، إضافة الملح إلى الماء المستعمل أثناء صنع الكسكس وإمكانية صنع الكسكس باستعمال خمسة أنواع من الدقيق الخالي من الجلوتين (الذرة، قطيفة، الحنطة السوداء، الكينوا والمنيهوت). تمت معاينة الخواص الريولوجية خلال التكتل الرطب من خلال مراقبة عزم الدوران باستعمال الريومتر® MTR-Caleva وبعد ذلك تمت محاولة صنع حبيبات الكسكس على مستوى المخبر باستعمال جهاز® Mi-Pro. بعد التحصل على هذه الحبيبات، تم تحديد مواصفاتها. بالإضافة الى ذلك، تم صناعة الكسكس باستعمال الدقيق الخالية من الجلوتين باتباع الطريقة التقليدية، وفي الأخير تمت معاينة خصائص الكسكس المصنع وذلك بتحديد خصائصه الفيزيائية، التكنولوجية، الطبخية والذوقية. سمحت لنا المعطيات التي تم جمعها من خلال الاستبيان بوضع مخطط يوضح خطوات تصنيع الكسكس التقليدي وتم الكشف عن العديد من الممارسات الرئيسية التي يمكن أن تؤثر بشكل كبير على جودة الكسكس. من بين هذه الممارسات، (1) الطهي المسبق للسميد الخشن قبل فتله، (2) استخدام المياه المالحة كسائل للفتل، (3) إضافة دقيق القمح اللين أو نشاء الذرة خلال خطوة تعديل شكل حبيبات الكسكس أثناء تصنيعها و (4) تجفيف الكسكس في الظل ثم في الشمس. قدمت إضافة دقيق القمح اللين إلى سميد القمح الصلب ودقيق الشعير خصائص ريولوجية التي من شأنها ان تزيد من قوة تماسك الحبيبات فيما بينها. اظهرت النتائج ان كميات السائل المثلى المستعملة للفتل يعتمد على العوامل المدروسة (للحصول على أقصى قوة تماسك): تميل نسبة السائل/الصلب (L/S) المثلى إلى الانخفاض مع ازدياد الملوحة وزيادة نسبة دقيق القمح اللين المضافة. تقلل ملوحة سائل الفتل من التماسك بين الحبيبات أثناء الخلط الصلب السائل (التأثير على توتر السطح السائل وقابلية الترطيب للمواد الصلبة) ويعطي ذلك إنتاج حبيبات أقل كثافة بأحجام متباينة. أظهرت الاختبارات إمكانية الفتل للدقيق الخالية من الجلوتين سواء على مستوى المختبر أو على الطريقة التقليدية، باستثناء دقيق المنيهوت الذي لا يفتل تحت تأثير التبليل والخلط. أظهرت التحليلات الحسية أن الكسكس المصنوع الخالي من الجلوتين لديه درجات مقبولة لجميع الصفات الحسية باستثناء الكسكس القطيفة الذي تم تصنيفه في المرتبة الأخيرة بسبب طبيعته اللزجة ونسيجه الأقل ثباتاً.

الكلمات الرئيسية. الاستبيان، الكسكس التقليدي، تكتل رطب، سميد القمح الصلب، دقيق الشعير، دقيق خال من الجلوتين.