

INFLUENCE DE LA POUDRE DE PULPE DE CAROUBE (*CERATONIA SILIQUA L.*) SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DE LA FARINE DE BLÉ TENDRE

YESLI Abdenour^{1*}, LATRECHE Sabrina¹, AISSIOU Mohammed Yehya El Amin¹ et AZZOUZ Latifa¹

1. Laboratoire Alimentation, Transformation, Contrôle et Valorisation des Agro-ressources, Ecole Supérieure des Sciences de l'Aliment et des Industries Agroalimentaires. Avenue Ahmed Hamidouche, Beaulieu Oued Smar 16200 Alger, Algérie

Reçu le 10/05/2021, Révisé le 13/10/2021, Accepté le 08/11/2021

Résumé

Description du sujet : La gousse de caroube et ses produits dérivés comme la pulpe, la farine sont de plus en plus employés dans l'industrie alimentaire en raison des multiples bénéfices qu'ils apportent aux produits finis comme la saveur, la couleur et l'enrichissement en nutriments. Le présent travail s'intéresse à étudier le rôle de la pulpe de poudre de caroube sur quelques paramètres qualitatifs de la farine boulangère commerciale de type 55.

Objectifs : Cette étude se fixe comme but de montrer l'influence de la poudre de pulpe de caroube sur les paramètres qualitatifs de la farine et de préciser les limites en supplémentation à ne pas dépasser. Nous avons fait appel aux techniques rhéologiques. Le travail est nouveau et se base sur la mesure alvéographique des paramètres qualitatifs de la farine comme la force boulangère ($W \times 10^{-4}$ J), la ténacité de la pâte (P en mmH₂O), l'extensibilité (L mm), le rapport de configuration (P/L) et l'indice d'élasticité (Ie), de résistance des alvéoles à la pression d'air mesurée par Px, PØ et Iex et sur l'activité des protéases de la farine par la mesure des paramètres alvéographiques après un temps de repos de 3 h.

Méthodes : Une farine panifiable type T55 supplémentée avec des pourcentages différents en pulpe de poudre de caroube a été utilisée. L'ensemble des analyses ont été effectuées en double en respectant les recommandations des méthodes officielles. L'ensemble des résultats ont été soumis à des tests statistiques comme l'ANOVA et la comparaison des moyennes avec le test de Student.

Résultats : L'addition de la pulpe de poudre de caroube à des taux n'excédant pas les 3% n'altère pas de façon importante les propriétés alvéographiques de la farine. La pâte reste imperméable aux gaz de fermentation et l'hydrolyse des protéines de réserve est dans des limites qui ne compromettent pas la qualité boulangère de la pâte.

Conclusion : Les propriétés technofonctionnelles de la farine sont altérées avec des supplémentations qui sont supérieures à 5 % en poudre de pulpe de caroube. Cependant un test de panification s'avère indispensable pour mesurer l'impact direct des supplémentations sur le produit fini à savoir le pain.

Mots clés : Farine panifiable ; poudre de pulpe de caroube ; Alvéolab, force boulangère et activité protéasique.

THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOFT WHEAT FLOUR FORTIFIED WITH CAROB PULP POWDER (*CERATONIA SILIQUA L.*)

Abstract

Description of the subject: The aim of this work is studying the effect of carob powder pulp on quality parameters of bakery flour type 55.

Objective: The limits in fortification that should not be exceeded. The originality of the study is the use of rheological tests. This study proposes to set fortification limits.

Methods: A bread flour type T55 supplemented with different percentages of carob powder pulp was used. All analyses were performed in duplicate in accordance with the recommendations of the official methods. All results were subjected to statistical tests such as ANOVA and the comparison of means with the Student's test

Results: The fortification of carob powder pulp at levels not exceeding 3% does not alter the rheological properties of the dough such as alveographic parameters, dough strength and protease activity.

Conclusion: The functional properties of the flour are altered by high fortification. A bread-making test is recommended.

Keywords: Bread flour, carob powder pulp, Alvéolab, baking strength and protease activity.

* Auteur correspondant: YESLI Abdenour, E-mail: yesli@essaia.dz

INTRODUCTION

Les céréales et plus particulièrement le blé tendre occupent une place centrale dans notre alimentation au quotidien. La mouture du blé tendre donne une farine blanche qui a perdu la majorité de ces fibres, concentrées majoritairement dans les couches externes des enveloppes appelées le son [1]. La farine est traditionnellement panifiée en pain de différents types (baguette, ficelles, bagasse, etc.), ce qui fait du pain l'aliment énergétique par excellence pour couvrir nos besoins glucidiques et protéiniques [2]. Cette consommation élevée en pain riche en macromolécules mais pauvres en fibres éliminées lors de la mouture sur cylindre, font du pain la matrice alimentaire idéale pour une fortification en fibres qui est l'une des stratégies de lutte contre les maladies métaboliques [3]. La fortification en fibre consiste en l'incorporation de fibres provenant d'autres espèces végétales comestibles dans un aliment disponible et accessible à un plus grand nombre de personnes, comme le pain afin d'améliorer d'une part sa densité nutritionnelle et d'autre part de lutter contre les maladies métaboliques tel que le diabète de type II [4]. Les nombreux travaux conduits dans ce domaine ont consisté en l'incorporation dans la farine soit du son gros ou finement moulu des grains de blé tendre ou dur [5, 6], d'enveloppe de pomme [7], de raisin [8] ou de poudres de feuilles séchées de *Moringa oleifera* [9]. Toutefois, l'incorporation de ses fibres a des effets soit positifs sur les propriétés rhéologiques et fonctionnelles des farines ou l'inverse. Ainsi Cai *et al* [10] ont observés que l'incorporation du son de blé dans les aliments à base de céréales produit des effets négatifs sur la rhéologie de la pâte, comme la réduction de sa résistance au pétrissage. A l'inverse de Kohajdová *et al.* [11] qui trouvent que l'addition des épilures de la peau de pomme à la farine influe positivement sur les propriétés fonctionnelles telles que la rétention d'eau, la capacité de gonflement ainsi que sur les propriétés rhéologiques mesurées au farinographe comme le temps de développement de la pâte et sa stabilité au pétrissage prolongé. La poudre de caroube est le produit de la fragmentation de la gousse de caroube préalablement décortiquée et séparée de ses graines avant d'être torréfié et réduite en poudre de granulométrie généralement inférieure à 100 µm.

De nombreux scientifiques rapportent que cette poudre est riche en fibres, en sucres, en polyphénols et en micronutriments [12]. La pulpe de caroube exempte de sucres, de protéines et de lipides est appelée fibre de caroube qui représente entre 30% et 40% du poids de la pulpe est obtenue principalement après élimination des sucres solubles dans l'eau [12]. Les fibres de la caroube sont constituées majoritairement de fibres insolubles non fermentaires et d'une infime quantité de fibres solubles qui ne dépassent pas les 10 g par 100 g de fibre de caroube [12]. Le rôle de la poudre de pulpe de caroube (*Ceratonia siliqua L*) sur les propriétés rhéologiques de la farine blanche commerciale n'a pas fait d'étude jusqu'à maintenant. C'est dans cette optique que nous avons entrepris d'étudier l'influence de cette poudre sur la qualité du gluten, l'élasticité et la consistance de la pâte, sur l'activité des protéases ainsi que sur le développement alvéolaire de la pâte.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. Matériel végétal

La présente étude a été réalisée à partir de la poudre de pulpe de caroube commerciale (type Caruma) fournie gracieusement par la Sarl Boublenza (Tlemcen, Algérie). Cette poudre de caroube a été choisie pour cette étude en raison de sa très grande richesse en fibres (tableau 1). Une farine de blé tendre panifiable de type T55, fournie par les Moulins Sopi (Blida, Algérie), a été utilisée pour réaliser la farine supplémentée en raison de son aptitude à la panification. La farine T55 a été supplémentée par la poudre de pulpe de caroube (PPC) à 1, 3, 5 et 7 (g/100g) respectivement.

2. Caractéristiques technologiques de la farine

La teneur en eau a été mesurée selon la norme 712 [13], dans une étuve isotherme à une température de 130°C pendant 1h30mn. Les cendres par incinération dans un four à moufle selon les recommandations de la norme 08-01 [14]. Le pourcentage en protéines par la méthode Kjeldahl (avec N × 5,7 pour le blé) norme 20483 [13]. Les lipides totaux selon la méthode 7302 [13]. La teneur en amidon endommagé a été déterminée à l'aide du SD4 Chopin selon la norme 17715 [13]. L'activité amylasique en utilisant le Falling Number 1500 de Perten Instruments AB, (Sweden) en suivant la norme de l'ICC 107/1 [15]. Le test consiste en la mesure de l'activité de l'alpha-amylase.

Il correspond au temps total nécessaire pour un agitateur viscosimétrique de traverser une distance prédéterminée en tombant dans un gel aqueux, préparé en chauffant un mélange de farine et d'eau dans un tube viscosimétrique. Le gel subit une liquéfaction due à l'attaque de l' α -amylase. La mesure du pH avec un pH-mètre de pailleuse préalablement calibré avec un rapport produit : eau distillée 1:10 (m/m).

3. Caractéristiques alvéographiques

Les caractéristiques rhéologiques de la farine de contrôle et supplémentée en PPC ont été déterminées à l'AlvéolabGraph de Chopin suivant la méthode 54–30 [14]. Les paramètres mesurés sont la force boulangère (W) ou travail de déformation de la pâte qui est évalué en 10^{-4} Joules, la ténacité (P) est la résistance de la pâte à la déformation exprimée en mm H₂O, l'extensibilité (L) est l'allongement de la pâte exprimée en mm. Le rapport de configuration (P/L) qui exprime la ténacité de la pâte sur son extensibilité et l'indice d'élasticité (Ie) qui est le rapport entre la mesure de pression exprimée en mm H₂O dans la bulle après avoir insufflé sous le pàton un volume d'air de 200 cm³, qui correspond à une longueur L de 40 mm, et au P maximal de la courbe. Toutes les mesures sont réalisées sur des pâtes à hydratation constante à 50% d'eau sur la base de 15% d'humidité [14].

4. Temps de relaxation

L'essai de relaxation est un essai alvéographique pour lequel 200 ml d'air sont injectés, puis la pression est mesurée. La pâte se relaxant, son volume augmente pour équilibrer les pressions internes et externes. Il en résulte une diminution de la pression interne. Les paramètres mesurés sont la pression maximale à l'extérieure de l'alvéolé (Px en mmH₂O),

la pression maximale à l'intérieure de l'alvéolé (PØ en mmH₂O), le temps de demi-relaxation (T1/2 en s) et l'indice d'élasticité (Ie en %) [16].

5. Activité protéasique

L'activité protéasique de la farine est un essai alvéographique mesurée à l'Alvéolab en suivant le protocole de Chopin technologie [16]. Le principe de la méthode consiste à préparer une pâte selon le protocole 54–30 (AACC, 2000) [14], puis à calculer le niveau d'activité des protéases de la pâte après 3 heures de repos dans une étuve thermostatée par rapport au témoin direct. Les paramètres mesurés sont le W, P et L.

6. Analyses statistiques

L'influence de la dose d'incorporation de la poudre de la pulpe de caroube sur les caractéristiques alvéographiques, sur le temps de relaxation et l'activité protéasique ont été analysées par l'ANOVA et le test de Student avec le logiciel SPSS 10.0 (IBM SPSS, USA). L'intervalle de confiance a été fixé à 95 %, soit une erreur de 5%.

RÉSULTATS

1. Qualité physicochimique et alvéographique de la farine T55

Comme mentionné sur l'emballage de la pulpe de poudre de caroube Caruma (tableau1), nous observons que cette poudre est très riche en fibres (40% ms), en sucres (80% ms) et pauvres en protéines (4,3%ms) et en lipides (1,0%ms). Dans le tableau (2), nous rapportons les résultats des analyses physicochimiques et rhéologiques effectués sur la farine T55. Les propriétés alvéographiques de la farine T55 enregistrées à l'AlveolabGraph® de Chopin sont illustrées par la figure 1.

Tableau 1 : Caractéristiques physicochimiques de la poudre de pulpe de caroube type Caruma

| | Humidité (% mh) | Cendre (%ms) | Fibres totales (%ms) | Glucides (%ms) | Protéines totales (%ms) | Lipides totaux (%ms) | pH |
|------------|--------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------|------|
| PPC | 5,74 | 3,12 | 40,00 | 80,00 | 4,3 | 1,0 | 4,99 |

Avec PPC : Poudre de Pulpe de Caroube

La farine T55 a une humidité conforme à la législation en vigueur qui exige des teneurs en eau dans la farine commerciale ne dépassant pas les 14%. Les cendres sont dans les limites fixées, la teneur en protéine de 9,60%ms, les lipides totaux sont inférieurs à 2% ms ce qui ne compromettra pas son stockage à long terme. La teneur en amidon endommagé qui rend compte de la sévérité du process de mouture,

montre que la T55 a une teneur en amidon endommagé dans les limites imposées en panification. La farine T55 est hypodiastatique avec des activités supérieures à 300 s. les propriétés alvéographiques de la T55 sont dans les fourchettes fixées pour les farines panifiables. La ténacité de la pâte est de 67 mm, l'extensibilité de 79 mm, la force boulangère de 175×10^{-4} J,

le rapport de configuration qui exprime le rapport entre la ténacité de la pâte sur son extensibilité est inférieur à 1 par contre son indice d'élasticité est de plus de 50% ce qui

témoigne de l'aptitude de cette farine à produire des pains volumineux et répondant aux exigences légales.

Tableau 2 : Caractéristiques physicochimiques de la farine T55

| | Humidité (% mh) | Cendre (% ms) | Protéines totales (% ms) | Lipides totaux (% ms) | Amidon endommagé (UCD) | Activité amylasique (s) |
|-------------------|--------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Farine T55 | 14,01±0,12 | 0,50±0,16 | 9,60±0,57 | 1,12±0,12 | 22 ± 2 | 330±10 |

Avec : UCD = unité Chopin Dubois

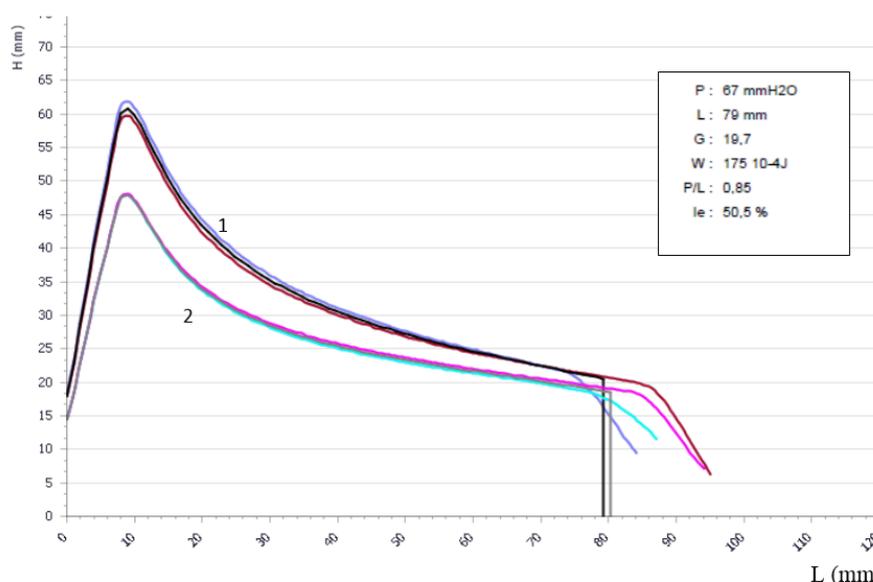


Figure 1 : Mesure des paramètres alvéographiques de la farine T55 à l'AlvéolabGraph de Chopin

Avec : 1 : courbe alvéographique, 2 : courbe activité protéasique

2. Influence de la poudre de pulpe de caroube sur les caractéristiques alvéographiques

Les résultats de l'influence de la PPC sur les caractéristiques alvéographiques de la farine sont donnés dans le tableau (3).

2.1. Ténacité de la pâte (P mmH₂O)

L'enrichissement de la farine témoin par des doses de plus en plus élevées en poudre de pulpe de caroube se traduit par l'augmentation de la ténacité de la pâte qui passe de 67 mm à 75 mm pour la farine avec 7% de PPC, soit une augmentation de la ténacité de 8 mm H₂O.

2.2. Extensibilité de la pâte (L mm)

En panification, l'extensibilité est souvent prise en compte pour prédire le comportement de la

pâte lors de la fermentation. Nous observons que la poudre de pulpe de caroube agit négativement sur L . L'extensibilité diminue au fur à mesure de l'addition de la PPC passant de 79 mm pour la T55 à 54 mm pour des enrichissements de 7% en PPC.

2.3. Force boulangère (W).

L'orientation des farines en panification, biscuiterie ou comme farine de force est le plus souvent tributaire des valeurs de la force boulangère. C'est un paramètre qui rend compte de la qualité des protéines de réserves. Nous observons une diminution du W chez les farines enrichies en PPC (T55 > Farine 1% > Farine 7% PPC).

Tableau 3 : Caractéristiques alvéographiques des farines sans et supplémentées avec la PPC

| | P (mm H ₂ O) | L (mm) | W (10 ⁻⁴ J) | P/L | Ie (%) |
|---------------|----------------------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|
| Farine T55 | 67±2,83 | 79±4,24 | 175±5,66 | 0,85±0,01 | 50±0,71 |
| Farine 1% PPC | 76±0,01 | 73±4,22 | 170±7,78 | 1,05±0,06 | 43±0,78 |
| Farine 3% PPC | 65±2,1 | 78±1,10 | 145±9,2 | 0,82±0,01 | 39±0,10 |
| Farine 5% PPC | 72±4,2 | 58±0,70 | 134±10,60 | 1,23±0,10 | 38±1,70 |
| Farine 7% PPC | 75±3,5 | 54±4,20 | 133±15,6 | 1,40±0,01 | 37±2,40 |

Avec : Farine T55 : farine sans PPC

2.4. Rapport de configuration de la pâte (P/L)

Une pâte boulangère de bonne qualité est souvent jugée par le rapport de la ténacité sur l'extensibilité, qui exprime l'équilibre entre les gluténines qui gouvernent la ténacité de la pâte sur les gliadines qui elles sont responsables de l'élongation et donc du gonflement de la pâte à la cuisson en présence d'agents levants. Nous observons que les farines deviennent de plus en plus tenaces en augmentant le taux de PPC. Ainsi la farine témoin présente un P/L de 0,85, augmente pour atteindre la valeur de 1,40 pour une supplémentation de 7%, ce qui se traduira par des produits cuits de faible volume.

2.5. Indice d'élasticité (Ie)

L'indice d'élasticité des farines diminue à mesure que la poudre de pulpe de caroube est ajoutée. Pour la farine témoin T55 l'Ie est de 50% témoin d'une farine apte à la panification. Les pâtes issues des farines enrichies en PPC perdent en fermeté avec la supplémentation. Cette perte en Ie débute pour des enrichissements en PPC de 3% pour atteindre des valeurs limites de 37% chez les farines avec 7% de PPC. Soit une baisse de 13% en fermeté. A ce stade d'enrichissement, la pâte devient tenace difficilement extensible.

3. Temps de relaxation

La résistance des alvéoles de la pâte à la pression d'air est un nouveau test qui commence à se généraliser surtout dans les farines enrichies en fibres. Nous observons dans le tableau (4) que la pression d'air exercée sur les alvéoles (Px) est la même pour les farines témoins et enrichies. Par contre la résistance aux pressions élevées à l'intérieure des alvéoles mesurée par (PØ) diminue de la farine T55 vers la farine à 7% en PPC. Les alvéoles de la farine T 55 résistent à des pressions de 32 mm H₂O puis deviennent poreuses pour ne supporter des pressions de l'ordre de 21,5 mmH₂O en présence de 7% en PPC. La même tendance est

aussi observée avec le temps de demi-relaxation qui est employé pour classer les farines. En effet, plus la farine est supplémentée en poudre de pulpe de caroube plus les alvéoles deviennent sensibles aux pressions des gaz des agents levants qui sont utilisées en boulangerie. L'indice de relaxation (Iex) qui exprime la capacité totale de la pâte à supporter des pressions de gaz diminue avec la supplémentation en PPC plus particulièrement pour des valeurs dépassant les 3% en fibres.

Tableau 4 : Influence de la PPC sur le temps de relaxation de la pâte de farine T55

| | Px (mmH ₂ O) | PØ (mmH ₂ O) | T1/2 (s) | Iex (%) |
|------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|------------|
| Farine T55 | 64±1,14 | 32±2,83 | 5,6±0,28 | 50,0±1,41 |
| Farine 1% PPC | 63±0,35 | 30±0,01 | 4,5±0,07 | 40,8±0,21 |
| Farine 3% PPC | 59±0,70 | 21±0,70 | 3,75±0,10 | 36,15±0,80 |
| Farine 5% PPC | 64±0,01 | 21±0,03 | 3,2±0,11 | 32,9±0,10 |
| Farine 7% PPC | 68±0,70 | 21±0,50 | 1,7±0,02 | 31,4±0,40 |

Avec : Px : pression d'air à l'extérieure de l'alvéole ; Po : pression d'air à l'intérieure de l'alvéole, T1/2 : temps de demi relaxation, Iex : indice de relaxation

4. Influence de la poudre de pulpe de caroube sur le pH et l'activité protéasique

Les résultats de l'influence de la PPC sur le pH ainsi que sur l'activité protéasique des farines sont résumés dans le tableau (5).

4.1. pH

Le pH est une mesure rapide qui permet d'estimer l'état d'altération de la farine. La poudre de pulpe de caroube influence négativement la stabilité de la farine. Le pH de la farine T55 est 6,2, et baisse avec l'ajout de la PPC pour finir par acidifier la farine, comme nous l'observons avec la farine à 7% en PPC qui enregistre un pH 5,6, soit une baisse de 0,6 en comparaison avec la farine témoin c'est-à-dire sans supplémentation en PPC (tableau 5).

Tableau 5 : Influence de la PPC sur le pH et l'activité protéasique de la farine

| | pH | P (mmH ₂ O) | L (mm) | W (×10 ⁻⁴ J) | P _{3H} (mmH ₂ O) | L _{3H} (mm) | W _{3H} (×10 ⁻⁴ J) |
|----------------|----------|---------------------------|-----------|----------------------------|---|-------------------------|--|
| FARINE 100% | 6,2±0,04 | 67±2,83 | 79±4,24 | 175±5,66 | 53±7,07 | 80±1,41 | 145±8,49 |
| FARINE+1%PPC | 6,0±0,01 | 76±0,00 | 73±4,40 | 170±7,78 | 71±1,77 | 65±0,0 | 158±2,47 |
| FARINE + 3%PPC | 5,8±0,05 | 65±2,10 | 78±7,10 | 145±9,20 | 58±0,01 | 52±6,40 | 106±7,80 |
| FARINE + 5% PC | 5,7±0,02 | 72±4,20 | 58.5±0,70 | 134±10,60 | 62±2,80 | 57±10,60 | 115±4,90 |
| FARINE +7% PPC | 5,6±0,01 | 75±3,50 | 54±4,20 | 133±15,60 | 68±0,70 | 38±8,50 | 97±4,80 |

4.2. Activité protéasique

Appelée aussi activité de dégradation, mesurée alvéographiquement et permet de quantifier

indirectement l'impact positif ou négatif des protéases de la farine sur les paramètres qualitatifs qui gouvernent l'orientation et la Nous observons que les paramètres alvéographiques (P, L et W) sont négativement affectés par la PPC. Comme rapporte le tableau (5), plus la farine est enrichi en poudre de pulpe de caroube, plus l'activité protéolytique devient intense et plus les paramètres qualitatifs se trouvent négativement impactés. Ainsi, la ténacité de la pâte (P) diminue quel que soit le taux de supplémentation. La perte en ténacité est de 4 mmH₂O pour la farine à 1% PPC, 7 mm H₂O à 3% PPC, 10 mm H₂O à 5% PPC et 7 mmH₂O pour 7% en PPC. La même tendance baissière est observée pour l'extensibilité. En effet, nous remarquons que l'extensibilité des pâtes est fortement affectée par des taux en PPC de 3% et de 7%. La perte en extensibilité est respectivement 26 et 16 mm. Quant à la force boulangère, nous constatons que la perte moyenne en W des farines enrichies en PPC est de 26×10^{-4} J avec un pic de perte de 39×10^{-4} J chez la farine avec 3% en PPC suivie de 36×10^{-4} J pour une supplémentation de 7% en poudre de pulpe de caroube.

DISCUSSION

La poudre de pulpe de caroube *Caruma* est très riche en fibres (40% ms), en sucres (80% ms) et pauvres en protéines (4.3%ms) et en lipides (1.0%ms). L'humidité de la farine est en accord avec les textes réglementaires algériens qui fixent la teneur en humidité finale dans les farines panifiables à 14% d'eau afin de ne pas compromettre leur stockage et aussi faciliter leur hydratation durant le processus de panification. Les cendres sont généralement utilisées comme le critère de classification des farines. Ainsi plus une farine est riche en cendre plus sa valeur commerciale diminue par contre sa densité nutritionnelle se trouve augmenter du fait de l'incorporation d'une plus au moins grande quantité d'enveloppes de grain qui sont très pourvues en minéraux [17]. La farine utilisée est très faiblement minéralisée mais nutritionnellement non satisfaisante puisqu'une plus grande partie des minéraux sont volontairement soustraits à cette farine. La teneur en protéines totale est relativement faible (9,60% ms). Cependant, ce sont les protéines de réserve qui interviennent dans la modulation des propriétés de poussée en cuve. Ces propriétés sont principalement dépendantes de la quantité et de la qualité en sous unités composants les gluténines. Ces unités s'assemblent après

machinabilité des farines en boulangerie instrumentée.

hydratation par l'intermédiaire de ponts disulfures entre les SG-HPM et SG-FPM [1] d'une part, et d'autre part, les protéines participent à la fixation de l'eau lors de l'hydratation ce qui aura pour conséquence l'augmentation des rendements en pains [1]. La teneur en lipides de la farine n'excèdent pas les 2% de la matière sèche. En panification, les lipides participent à la stabilisation des alvéoles formées au cours de la fermentation levurienne par contre une plus grande concentration en lipides dans la farine réduit considérablement le temps de stockage ainsi que les propriétés boulangères. En effet, il a été rapporté que les lipides s'oxydent rapidement durant le stockage, entraînent la formation de composés secondaires rances et acidification de la farine, ce qui accélèrera l'activité protéolytique des protéases endogènes et de contamination contribuant à la réduction du pouvoir panaire de la pâte [18]. L'amidon est une macromolécule formée par un enchainement de glucides de type glucose, et constitue la principale source d'énergie sous forme de carbohydrates. C'est le composant majoritaire des céréales, où il est très abondant (65-70%) [19]. L'amidon se trouve sous forme de particules, appelées grain d'amidon. Ces particules sont identiques pour une même origine botanique [20] et fournissent plus de 80% des calories consommées par les êtres humains dans le monde [21]. Son endommagement vient du processus d'extraction sur cylindres, lorsque ils sont trop serrés, endommagés ou vétustes. Une farine présentant un taux en amidon endommagé excessivement élevé donnera une pâte ferme au pétrissage et des pains fortement colorés avec une croûte molle. Le taux d'amidon endommagé de la T55 est de 22 UCD, ce qui est légèrement élevé aux recommandations pour le pain alvéolé type baguette qui exige des taux en amidons endommagés entre 16 et 20 UCD [22]. En panification, la mesure de l'activité amylasique est importante pour le choix des farines à mettre en œuvre. Une farine issue de blé germé absorbe moins d'eau, donne une pâte collante, et difficile à pétrir mécaniquement. Les pains obtenus ont de faible volume, s'affaissent lors de la cuisson et présentent une croûte rouge et foncée. Les taux en α amylase de la farine T55 sont dans la limite supérieure recommandée pour les farines panifiables (200 -300 secondes). Les propriétés alvéographiques

de la farine T55 enregistrées à l'AlveolabGraph® de Chopin sont les paramètres d'analyses habituellement recommandés dans les contrats commerciaux [23].

La force boulangère (W) de la farine T55 est de $175 \pm 5,66 \times 10^4 J$, la ténacité mesurée par P de $67 \pm 2,83 \text{ mm H}_2\text{O}$, l'extensibilité L en mm de $79 \pm 4,24$, le rapport de configuration qui exprime l'équilibre de la pâte de $0,85 \pm 0,01$ et l'indice d'élasticité Ie en % de $50,5 \pm 0,71$. En se référant aux textes cadrant les farines de panification produites et vendues sur le territoire nationale. Nous observons que la T55 est en accord avec les exigences de la législation nationale qui fixe le W supérieur ou égal à $180 \times 10^4 J$. L'Influence de la poudre de pulpe de caroube sur les caractéristiques alvéographiques montre que les paramètres qualitatifs sont affectés. La ténacité de la pâte (P mmH₂O) qui mesure la résistance au pétrissage exprimé la plus au moins grande résistance qu'oppose la pâte aux sollicitations de déformations manuelles ou mécanique. Le P de la pâte est le plus souvent corrélé pour les farines convenablement hydraté à la teneur en gluténines, qui sont des protéines polymériques majoritaires dans le gluten de la farine [1]. Plus la ténacité est élevée plus il faudra plus d'énergie et de temps pour pétrir la pâte. Nous observons que l'ajout de la PPC se traduit par un léger accroissement de la ténacité des pâtes. Toutefois, l'analyse de la variance fait ressortir que la poudre de caroube agit marginalement sur l'accroissement de la ténacité de la pâte. La poudre de pulpe de caroube est un aliment sans gluten, c'est-à-dire sans gluténines et gliadines, qui sont les deux protéines fonctionnelles [24]. Certains auteurs ont rapporté que l'ajout de fibres alimentaires aux matrices céréalières se traduit souvent par l'augmentation de la ténacité par suite de la compétition entre les fibres et les protéines de la farine pour la fixation de l'eau d'hydratation [25, 26]. Il s'ensuit qu'une partie de cette eau se fixe sur les fibres, privant les gluténines de s'hydrater entièrement. Afin de compenser la sous hydratation des protéines de réserves, Dexter *et al.* [26] préconisent de déterminer soit au farinographe ou au consistographe la quantité d'eau à ajouter à la farine pour compenser l'eau absorbée par les fibres rajoutées. L'extensibilité de la pâte (L mm) qui est la propriété que possède une pâte à s'étirer sans se rompre ; est l'un des paramètres les plus scruté en panification en raison de la capacité de la pâte à plus au moins gonfler sous l'action du gaz carbonique de la fermentation. L'extensibilité de la pâte est le plus souvent dépendante de la teneur en gliadines de la pâte, de leurs degrés d'oxydations et aussi des multiples possibilités d'association avec les

autres molécules environnantes pour se déployer dans l'espace [24, 27]. Nous remarquons que la PPC agit négativement sur l'extensibilité de la pâte à des supplémentations supérieures à 3% en fibres ($p < 0,05$). La perte en extensibilité est de 21 mm pour une supplémentation de 5% en PPC, et atteint 25 mm lorsque la quantité en PPC est de 7%. L'action négative des fibres sur l'extensibilité proviendrait de la sous hydratation des gliadines d'une part et de la réduction éventuelle des liaisons disulfures qui pourraient se former et permettre aux gliadines de conférer à la pâte de la souplesse et de l'expansion d'autre part [28]. La force boulangère (W) est le critère le plus employé pour orienter les farines de blé tendre vers la panification. L'analyse de la variance au seuil de 5%, montre que l'ajout de la PPC à la farine T55 s'accompagne de la diminution du W. En effet, la comparaison des moyennes montre que pour l'ensemble des supplémentations, les différentes farines forment un seul groupe. La baisse de la force boulangère des farines aura comme conséquence directe la réduction du pouvoir de la pâte à supporter les contraintes mécaniques d'étirement et d'élongation durant les phases de pétrissage et de fermentation. Le W exprime aussi l'aptitude du gluten de la pâte après hydratation à supporter les contraintes que ce soit de pétrissage que d'expansion due au gaz carbonique produits par les agents fermentaires. Ainsi l'ajout de la PPC se traduit par la diminution des propriétés élongationnelles du gluten à la suite d'un dépliement partiel des protéines constitutives du gluten à savoir les gliadines et les gluténines [27]. Della-Valle *et al.* [25] rapportent que les fibres rentrent en compétition avec l'eau d'hydratation entraînant une sous hydratation de la pâte par la réduction de la quantité d'eau disponible nécessaire à la formation du réseau glutineux qui constituera l'ossature de la pâte et soutiendra les contraintes mécaniques dues aux actions de pétrissage et de gonflement par les levures incorporées lors de la préparation du pain. Pour éviter de sous hydrater le gluten de la farine, Saccotelli *et al.* [29] préconisent soit d'hydrater au préalable les fibres avant de les ajouter à la farine ou de les incorporer à la fin du pétrissage. Le rapport de configuration de la pâte (P/L) qui est l'équilibre entre la ténacité sur l'extensibilité de la pâte appelé aussi indice de valeur boulangère des farines [28] est fortement influencée par l'ajout de la PPC.

Ainsi la teneur en PPC agit négativement sur le rapport de configuration de la pâte qui est considéré comme un bon indicateur de la machinabilité de la pâte [28]. Il a été rapporté que ce paramètre est fortement tributaire de la teneur en protéine de la farine [26]. En panification, les boulangers cherchent des blés avec des P/L inférieurs à 0,7 [30, 31]. Pour notre farine témoin, le P/L est inférieur à 1, par contre, plus on rajoute de poudre de pulpe de caroube plus le rapport se déséquilibre. Comme la PPC est pauvre en protéine, l'augmentation du P/L proviendrait de la sous hydratation des protéines de réserve de la farine par suite de la compétition entre les fibres de la PPC et les macromolécules de la farine pour l'eau d'hydratation. Selon Preston *et al.* [32], la ténacité P est fortement influencée par la quantité d'eau disponible dans la pâte et aussi par les fibres solubles comme les arabinoxylanes, qui sont des molécules très hydrophiles. L'Indice d'élasticité (Ie) de la pâte mesuré par le rapport P0/P avec P0 correspondant à la pression atteinte pour une longueur d'extensibilité (L) mesurée à l'alvéogramme de 4 cm [33], employé pour prédire l'élasticité de la pâte est aussi négativement impacté par la PPC. En général, de faibles Ie témoignent d'une pâte tenace, alors que des valeurs élevées renvoient à des pâtes extensibles. Ce paramètre est aussi directement influencé par la quantité de PPC présent dans la farine. La farine T55 a un Ie de 50%, qui est jugée extensible tend à devenir très tenace au fur à mesure de l'augmentation en poudre de pulpe de caroube. Un manque de résistance élastique (indice d'élasticité < 45%) se traduira en panification par un relâchement de la pâte ou un manque de tolérance au pétrissage et en fermentation ce qui aura pour conséquence directe la production de pain faiblement volumineux à la cuisson par suite de la diffusion hors de la pâte des gaz de fermentation générés par l'activité fermentaire des levures boulangères incorporées [33]. Le temps de relaxation de la pâte, consiste à mesurer dans des conditions contrôlées sur un pâton de pâte la pression d'air susceptible d'être retenue par les alvéoles de la pâte. Les paramètres étudiées sont la pression extérieure d'air sur les alvéoles (Px), la pression d'air à l'intérieure des alvéoles (PØ), le demi temps de relaxation (T1/2) qui correspond à la perte de 50% de pression d'air dans les alvéoles et enfin l'indice d'élasticité (Iex) qui est le volume d'air emmagasinée par les alvéoles après 4 cm d'extensibilité.

Iex est un paramètre qui renseigne sur le développement alvéolaire de la pâte [34]. Le Px n'est pas influencé par la présence de PPC dans la pâte, par contre la résistance des alvéoles à la pression d'air (PØ) est affectée par la PPC. En effet, plus la farine est supplémentée en PPC plus la résistance des alvéoles à la pression d'air diminue. La farine T55 supporte des pressions d'air de $32 \pm 2,83$ mm H₂O et diminue de 11 mm H₂O dans les farines supplémentées. La perte de résistance des alvéoles aux pressions de gaz proviendrait de la discontinuité du réseau glutineux entourant les alvéoles par suite d'un défaut de développement des fibrilles protéiniques des gluténines et des gliadines [35]. Le temps de demi-relaxation mesurée en seconde des pâtes de la farine témoin et de celles enrichies en PPC diminue au fur à mesure de l'incorporation de la poudre de pulpe de caroube. Elle est de 5,6 s pour la farine de contrôle et diminue pour atteindre la valeur de 1,7 s chez la farine avec 7% de PPC. Cette diminution montre que les fibres de la caroube agissent négativement sur la résistance des alvéoles de la pâte à supporter des pressions élevées en gaz. En panification, l'essentiel du gaz provient de la fermentation qui donne au pain final le volume désiré avec un alvéolage développé témoin de la bonne qualité du pain final. Ainsi, Bonnardel [36] rapportent que le temps de relaxation de la pâte est un bon indice de classification des farines. Les farines qui possèdent des temps de relaxation compris entre 5,7 et 6,4 s sont considérées bonnes à la panification à l'opposé des farines qui présentent des valeurs de relaxation inférieures à 1,70 s, sont plutôt jugées mauvaises pour la production de pains baguettes alvéolés. Selon Della Valle *et al.* [25], l'addition de fibre modifie la structure alvéolaire, soit par la limitation du mouvement ascendant des bulles de gaz produites pendant la fermentation, soit par une coalescence accrue des bulles, les fibres déstabilisant les films liquides interfaciaux, ce qui conduit à une alvéolation plus grossière. De même, nous relevons que l'indice de relaxation des pâtons mesuré par la capacité de rétention par les alvéoles de la pâte d'un volume d'air de 200 ml diminue de 18,6% entre la farine T55 et supplémentée avec 7% de PPC. La poudre de pulpe de caroube agit aussi sur le pH et l'activité protéasique de la farine. Le pH de la farine correspond aux protons produit lors de l'oxydation des acides gras non estérifiés issues de l'hydrolyse des triglycérides par les lipases endogènes,

des acides aminés acides et des acides phosphoriques de la farine [37]. Le pH est associé à la concentration, mais aussi à l'activité chimique de l'ion hydrogène H^+ dans une solution ou un milieu hydraté. En présence d'acides, en fonction de la concentration en ions H^+ libérés dans le milieu et en fonction de la nature du milieu, le pH diminue. Il existe donc un lien entre le pH et la mesure de l'acidité totale (TTA) [37]. Le pH de la poudre de pulpe de caroube est de 4,99. Cette acidité provient principalement des différentes classes de molécules formant les polyphénols plus particulièrement l'acide gallique, qui est le composé majoritaire [38]. L'addition de la PPC à la farine se traduit par l'abaissement de son pH qui passe de 6,17 à 5,67 pour la farine contenant 7% de PPC, soit une diminution de 0,5. Cette acidification s'expliquerait par la libération par les polyphénols de la PPC de protons dans la farine entraînant la baisse de son pH et donc son acidification [38]. En effet, plusieurs études ont montré que l'acidification de la farine pénalise la qualité organoleptique du pain avec développement du goût de rancidité ainsi que la perte en expansion de la pâte par suite de l'hydrolyse des ponts disulfures du gluten, ce qui rend la pâte perméable aux gaz carbonique de la fermentation [25]. Les protéases sont des enzymes protéolytiques habituellement présentes dans la farine. Leur activité est limitée en raison de la pauvreté de la farine en acides aminés acides. Les protéases de la farine ont des activités catalytiques optimales allant de pH 4 pour les 14C_Hbase et cbz-Phe-Ala hydrolase (CPAase) tandis que les BANAase, les LNAase, et les Esterases sont plutôt actives à des pH entre 7 et 9 [39]. L'activité des protéases endogènes de la farine sur les propriétés alvéographiques sur des disques de pâtes indiquent que pour des pH acides c'est-à-dire inférieurs à 6, une partie des enzymes protéasiques s'activent en hydrolysant les ponts disulfures des agrégats protéiques de complexes gliadines- gluténines [1] provoquant la baisse de la ténacité de la pâte, de l'extensibilité et de la force boulangère. Les variations de P, L et W sont de 5 mm H_2O , 8 mm et $12 \times 10^{-4}J$, respectivement pour 1% de PPC, et très intense lorsque la supplémentation est de 7% en PPC. L'action des protéases est souvent recherchée dans le cas des farines de forces pour améliorer leur extensibilité [40]. Cependant, dans notre cas, nous observons que l'acidification de la farine par la PPC entraîne une réduction de l'ensemble des paramètres

alvéographiques avec un maximum de perte dans les farines enrichies avec 7% de poudre de pulpe de caroube.

CONCLUSION

Les analyses physicochimiques et alvéographiques ont montré qu'une supplémentation de 1 à 7% de la farine de blé par la poudre de pulpe de caroube, entraîne d'une part une diminution de l'ensemble des paramètres alvéographiques, de rétention gazeux et l'activation des protéases endogènes de la farine T55. L'activation des enzymes protéolytiques est intense pour des pH 5,6. Ces résultats montrent que la supplémentation de la farine de blé par la poudre de pulpe de caroube augmente la densité nutritionnelle des farines par l'incorporation de fibres mais s'accompagne d'une diminution des propriétés technofonctionnelles des pâtes mesurées à l'AlvéolabGraph de Chopin. L'analyse de la variance au seuil de 5% fait ressortir que les paramètres alvéographiques, de relaxation et de l'activité protéolytique que des suppléments n'excédant pas les 3% en poudre de pulpe de caroube semble ne pas affecter négativement les valeurs boulangères de la pâte. Cependant des essais de panifications sont nécessaires pour préciser les limites de supplémentation à ne pas dépasser pour ne pas compromettre les paramètres qualitatifs comme le développement du pain, la couleur de la croûte, de la mie ainsi que le nombre, la taille et la distribution des alvéoles à la surface de la mie du pain.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Feillet, P. (2000). Le grain de blé: composition et utilisation. *Editions Quae*
- [2] Rastoin, J.L. et Benabderrazik E.H. (2014). Céréales et oléoprotéagineux au Maghreb Pour un co-développement de filières territorialisées. Chapitre Algérie. *Institut de prospective économique du monde méditerranéen (IPMED)*, Mai 2014 :pp.4-36
- [3] Folmer, F., Basavaraju, U., Jaspars, M., Hold, G., El-Omar, E., Dicato, M., Diederich, M., 2014. Anticancer effects of bioactive berry compounds. *Phytochem. Rev.* 13,295–322
- [4] Zhu, B. J., Zayed, M. Z., Zhu, H. X., Zhao, J., & Li, S. P. (2019). Functional polysaccharides of carob fruit: a review. *Chinese medicine*, 14(1): 1-10.
- [5] Saccotelli, M. A., Conte, A., Burrafato, K. R., Calligaris, S., Manzocco, L., Del Nobile, M. A. (2017). Optimization of durum wheat bread enriched with bran. *Food science & nutrition*, 5(3): 689-695
- [6] Alzuwaid, N. T., Fleming, D., Fellows, C. M., Laddomada, B., Sissons, M. (2021). Influence of Durum Wheat Bran Particle Size on Phytochemical Content and on Leavened Bread Baking Quality. *Foods*, 10(3): 489.

- [7] **Masoodi, F. A., Chauhan, G. S. (1998)**. Use of apple pomace as a source of dietary fiber in wheat bread. *Journal of Food Processing and Preservation*, 22(4), 255-263.
- [8] **Hayta, M., Özüğür, G., Eteği, H., Şeker, İ. T. (2014)**. Effect of Grape (*Vitis Vinifera* L.) Pomace on the Quality, Total Phenolic Content and Anti-Radical Activity of Bread. *Journal of food processing and preservation*, 38(3): 980-986.
- [9] **Sengev, A. I., Abu, J. O., Gernah, D. I. (2013)**. Effect of *Moringa oleifera* leaf powder supplementation on some quality characteristics of wheat bread. *Food and nutrition sciences*, 4(3): 270.
- [10] **Cai, L., Choi, I., Lee, C. K., Park, K. K., Baik, B. K. (2014)**. Bran characteristics and bread-baking quality of whole grain wheat flour. *Cereal Chemistry*, 91(4): 398-405.
- [11] **Kohajdová, Z., Karovičová, J., Magala, M., & Kuchtová, V. (2014)**. Effect of apple pomace powder addition on farinographic properties of wheat dough and biscuits quality. *Chemical papers*, 68(8): 1059-1065.
- [12] **Owen RW, Haubner R, Hull WE, Erben G, Spiegelhalter B, Bartsch H (2003)**. Isolation and structure elucidation of the major individual polyphenols in carob fibre. *Food Chem Toxicol*;41(12):1727–38.
- [13] **ISO 712:2009/20483:2006 /7302:1982** : Céréales et produits céréaliers — Détermination de la teneur en eau — Méthode de référence, Détermination de la teneur en azote et calcul de la teneur en protéines brutes — Méthode de Kjeldahl, détermination de la teneur en matières grasses totales.
- [14] **AACC Approved Methods of Analysis**, 11th Edition: 2000
- [15] **ICC 107/1**, International Association for Cereal Science and Technology, Standard Methods (2021)
- [16] Chopin technologie: <https://chopin.fr/>
- [17] **Rémésy, C., Leenhardt, F., Fardet, A. (2015)**. Donner un nouvel avenir au pain dans le cadre d'une alimentation durable et préventive. *Cahiers de nutrition et de diététique*, 50(1):39-46)
- [18] **Park, S. H., Bean, S. R., Chung, O. K., & Seib, P. A. (2006)**. Levels of protein and protein composition in hard winter wheat flours and the relationship to breadmaking. *Cereal Chemistry*, 83(4): 418-423.
- [19] **Nicolas, J., Potus, J. (2000)**. Interactions between lipoxygenase and other oxidoreductases in baking. In *VTT SYMPOSIUM* . Vol. 207: pp. 103-120.
- [20] **Jane, J. L. (2006)**. Current understanding on starch granule structures. *Journal of Applied Glycoscience*, 53(3): 205-213.
- [21] **Thomas, D. J., Atwell, W. (1999)**. Practical guides the food industry in starch. St. Paul: Eagan.
- [22] **Dubat, A. (2004)**. Importance de l'endommagement de l'amidon et évolution des méthodes de mesure. *Industries des céréales*, 2-8.
- [23] **Joradep 91-572**. Décret exécutif n° 91-572 du 24 Joumada Ethania 1412, relatif à la farine de panification et au pain.
- [24] **Shewry, P. R., Tatham, A. S., Forde, J., Kreis, M. et Mifflin, B. J. (1986)**. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: a reassessment. *Journal of Cereal Science*, 4(2) : 97-106.
- [25] **Della Valle, G., Chiron, H., Saulnier, L. (2019)**. Enrichissement des produits céréaliers en fibres alimentaires: opportunités et contraintes technologiques. *Innovations Agronomiques*, 78, 55-68.
- [26] **Dexter, J. E. et Edwards, N. M. (1998)**. The implications of frequently encountered grading factors on the processing quality of durum wheat. *Canadian Grain Commission, Grain Research Laboratory*.
- [27] **Bloksma, A. H., Bushuk, W., Pomeranz, Y. (1988)**. Wheat chemistry and technology. *Rheology and chemistry of dough*, 2: 131-200.
- [28] **Roussel, P., Chiron, H., Della Valle, G., Ndiaye, A. (2010)**. Recueil de connaissances sur les descripteurs de qualité des pâtes et des pains ou variables d'état pour la panification française. *Glossaire terminologique appliqué aux pains français*.
- [29] **Saccotelli, M. A., Conte, A., Burrafato, K. R., Calligaris, S., Manzocco, L., Del Nobile, M. A. (2017)**. Optimization of durum wheat bread enriched with bran. *Food science & nutrition*, 5(3): 689-695.
- [30] **Barak, S., Mudgil, D., Khatkar, B. S. (2013)**. Relationship of gliadin and glutenin proteins with dough rheology, flour pasting and bread making performance of wheat varieties. *LWT-Food Science and Technology*, 51(1):211-217.
- [31] **Bralnard (2019)**. in Compréhension du rapport "Ténacité/ Extensibilité" et du volume du pain : <https://www.fsov.org/uploads/2019/3/fsov-2008-k-rapport-tenacite-extensibilite-article.pdf>.
- [32] **Preston, K. R., Kilborn, R. H., Dexter, J. E. (1987)**. Effects of starch damage and water absorption on the alveograph properties of Canadian hard red spring wheats. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 20(2): 75-80.
- [33] **Kitissou, P. 1995**. Elasticity index (Ie) as a new alveograph parameter. *Industries des Cereales* (France).
- [34] **Launay, Ph Roussel, J. Bure, (1978)** in "Propriétés rhéologiques des pâtes et valeur boulangère des farines de blé de variétés pures". *ICC WINNIPEG* 16 : 22/9/78.
- [35] **Jéantet R., Croguennec T., Schuck P. et Brule G. 2007**. Sciences des aliments, vol 2. Edit. *TEC et DOC*, Lavoisier, paris: pp 144-189.
- [36] **Bonnardel 1984**. Appreciation of the baking value of wheat flours by the dough relaxation experiment: wheat from 1983 harvest. *Industries des Cereales*.
- [37] **Castello, P., Potus, J., Baret, J. L. et Nicolas, J. (1999)**. Effects of mixing conditions and wheat flour dough composition on lipid hydrolysis and oxidation levels in the presence of exogenous lipase. *Cereal chemistry*, 76(4): 476-482.
- [38] **Roussel, P., Onno, B., Michel, E., Sicard, D. (2020)**. La panification au levain naturel (p. 100). *éditions Quae*.
- [39] **Yukio Kawamura, Daizo Yonezawa (1982)**. Wheat Flour Proteases and Their Action on Gluten Proteins in Dilute Acetic Acid, *Agricultural and Biological Chemistry*, 46:3: 767-773.
- [40] **Caballero, P. A., Gómez, M., Rosell, C. M. (2007)**. Improvement of dough rheology, bread quality and bread shelf-life by enzymes combination. *Journal of food engineering*, 81(1): 42-53.