



HAL
open science

Study of microwave cooking of legumes with excess water: The case of chickpeas

Clarissa Detomi de Albuquerque, Paul Carrey, Philippe Bohuon, Bernard Cuq

► To cite this version:

Clarissa Detomi de Albuquerque, Paul Carrey, Philippe Bohuon, Bernard Cuq. Study of microwave cooking of legumes with excess water: The case of chickpeas. MATEC Web of Conferences, 2023, 379, pp.05007. 10.1051/mateconf/202337905007. hal-04157730

HAL Id: hal-04157730

<https://hal.science/hal-04157730v1>

Submitted on 10 Jul 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Study of microwave cooking of legumes with excess water: the case of chickpeas.

Clarissa DETOMI de ALBUQUERQUE¹, Paul CARREY¹, Philippe BOHUON², Bernard CUQ¹

1 : UMR IATE 1208 - INRAE ; Institut Agro Montpellier ; Université de Montpellier. 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier - Cedex 5, France.

clarissa.detomi@supagro.fr

2 : UMR QualiSud - Université de Montpellier ; CIRAD ; Institut Agro Montpellier ; Avignon Université ; Université de La Réunion. Montpellier, France

Abstract: In the context of the agro-ecological transition towards sustainable systems, legumes are a real opportunity in terms of agronomy and nutrition. The development of vegetable seed consumption is currently hampered by the problem of the long hydration and cooking stages of current processes. Low CO₂ emission processes, such as microwave treatment, are preferred. The efficiency of these processes relies on the transformation of the energy contained in an electromagnetic wave into heat within materials with dielectric losses. The objective of the presented work is to study the evolution of the characteristics of leguminous seeds during the operation of cooking in excess of water by microwave treatment. Kinetics of texture modification and mass gain of the seeds were performed for three different levels of microwave power (between 400 and 1200 W) and compared to hot plate cooking. Empirical models by multi-parameter equations were proposed and validated by a 1000 W treatment. The results show that the evolution of hardness and mass gain is strongly related to the evolution of mass transfer coupled with volume heat transfer phenomena, specific to electromagnetic wave heating. Two different profiles of hardness and mass gain were observed depending on the type and intensity of the treatment. This work is a preliminary experimental study allowing to express hypotheses, which will be validated later by a more thorough study.

Etude de traitement par micro-ondes des légumineuses en excès d'eau : cas des pois-

chiches Clarissa DETOMI de ALBUQUERQUE¹, Paul CARREY¹, Philippe BOHUON², Bernard CUQ¹

¹UMR IATE 1208 - INRAE ; Institut Agro Montpellier ; Université de Montpellier. 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier - Cedex 5, France. clarissa.detomi@supagro.fr

²UMR QualiSud - Université de Montpellier ; CIRAD ; Institut Agro Montpellier ; Avignon Université ; Université de La Réunion. Montpellier, France.

1. Introduction

Face aux défis de la transition écologique et de la transition alimentaire vers des systèmes durables, la consommation de légumineuses représente une opportunité agronomique et nutritionnelle (Day, 2013). Au cours de leurs procédés de transformation, les opérations unitaires d'hydratation et de cuisson des graines sont des étapes critiques pour la maîtrise des qualités. Les travaux présentés concernent l'étude d'une technologie innovante pour l'opération de cuisson des graines, via l'utilisation des micro-ondes. Le traitement par les ondes électromagnétiques permet de chauffer rapidement les aliments grâce aux mécanismes d'absorption des ondes, favorisés par les fortes valeurs de pertes diélectriques de la matière. L'énergie électromagnétique génère la rotation des molécules dipolaires, notamment les molécules d'eau, qui induisent des frictions moléculaires intenses et un dégagement de chaleur dans le volume de l'aliment traité (Albuquerque *et al.*, 2019). Ce traitement peut engendrer des modifications structurelles des propriétés fonctionnelles des constituants de la matière, par exemple l'agrégation de protéines (Pomerai *et al.*, 2003). L'objectif des travaux présentés est d'étudier l'évolution des propriétés de graines de légumineuses au cours de l'opération de cuisson en excès d'eau par traitement micro-ondes (à différentes puissances, comprises entre 400 et 1200W), et de construire les cinétiques de modification de texture et du gain massique. Des modèles cinétiques sont proposés pour décrire les phénomènes.

2. Matériel & méthodes

2.1 Tri et stockage

Les graines sèches de pois chiches (de la marque Saint Eloi®) ont été achetées dans un magasin de Montpellier. Les graines sont triées à l'aide d'un séparateur nettoyeur (Westrup type LA-LST) réglé à une vitesse de 1700 rpm. Les graines avec un diamètre supérieur à 7 mm sont récupérées et stockées en chambre froide à 5°C. D'après le fournisseur, la composition des graines de pois chiches est la suivante : 45,9 g de glucides, 20,6 g de protéines et 4,8 g de matières grasses pour 100 g de pois chiches secs. La teneur en eau (environ 10% base humide) a été mesurée avant hydratation.

2.2 Hydratation par trempage

L'étape d'hydratation des graines est réalisée dans un récipient en verre de 1500 ml. Un échantillon d'environ 200 g de graines de pois chiches est immergé dans de l'eau à température ambiante, avec un rapport massique pois chiches / eau égal à 1/3. Le récipient est stocké pendant 16h à 5°C dans une chambre froide. Après trempage, le teneur en eau des graines, mesurée par étuvage pendant 2h à 130°C, est égale à 55% (base humide). Après trempage, les graines sont récupérées par égouttage et soumises directement à l'opération de cuisson.

2.3 Cuisson sur plaques chauffantes en excès d'eau

La cuisson "classique" des graines est réalisée dans un bécher en pyrex de 1 L, déposé sur une plaque chauffante (PZ 28-2, Harry Gestigkeit GMBH, Düsseldorf) préchauffée à 285°C, sans agitation. Un échantillon de 75 g de graines hydratées est ajouté à 600 g d'eau filtrée à température ambiante dans le bécher. Le bécher est déposé sur la plaque chauffante. La température de l'eau de cuisson est mesurée à l'aide des 2 fibres optiques (Reflex Neoptix) reliées à une centrale d'acquisition (Qualitrol Company LLC de Fairport, NY, USA). La précision de mesure des fibres optiques est de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Différents traitements ont été testés : (i) traitements pendant la phase de montée en température jusqu'à ce que l'eau atteigne 60 ou 100°C ; (ii) traitements pendant une durée de 5, 10, 20, 30 et 40 min après que l'eau soit à 100°C. Après traitement, les graines sont égouttées, refroidies par ruissellement d'eau à température ambiante pendant 30 sec et essuyées pour éliminer l'eau de surface.

2.4 Cuisson par traitement micro-ondes en excès d'eau

Le traitement micro-ondes est réalisé dans un équipement pilote (SAIREM, Rhône, FR). Il est constitué (Figure 1) : d'une enceinte cylindrique horizontale de 48L (1) avec un dispositif d'ouverture rapide

(2), une fente émettrice d'onde (3), un guide d'onde (4) avec un piston pour ajuster la puissance réfléchie, un générateur de micro-ondes (5) à une fréquence de 2,45 GHz et un boîtier de commande (6). Les traitements sont réalisés avec émission en continu des micro-ondes, à 3 puissances incidentes (400, 800 et 1200 W).

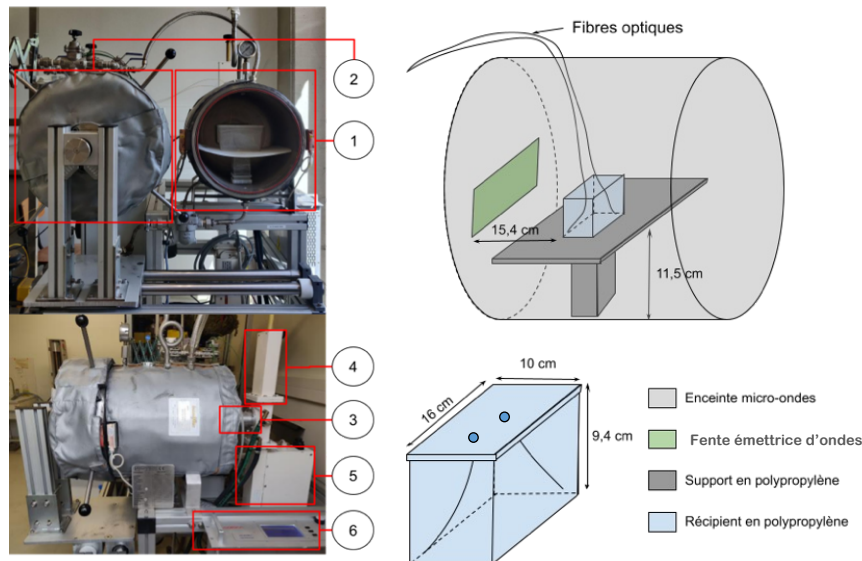


Figure 1. Photographie (gauche) et représentation schématique (droite) du dispositif expérimental utilisé pour la cuisson des graines par traitement micro-ondes.

Les graines hydratées sont traitées dans un récipient rectangulaire en polypropylène, fermé par un couvercle, sans système d'agitation forcée. Un échantillon de 75 g de graines hydratées est ajouté à 600 g d'eau filtrée à température ambiante. Le récipient est positionné devant l'antenne (Figure 1). La température de l'eau est mesurée au cours du traitement par 2 fibres optiques (Reflex™ Neoptix, BC, Canada), reliées à une centrale d'acquisition (Qualitrol Company LLC de Fairport, NY, USA) avec le logiciel Optilink™ (Neoptix). Les sondes sont positionnées à différents endroits dans le récipient : du côté de l'antenne ; à l'opposé de l'antenne. Différents traitements ont été testés : (i) traitements pendant la phase de montée en température jusqu'à ce que l'eau atteigne 60 ou 100°C ; (ii) traitements pendant une durée de 5, 10, 20 et 30 min après que l'eau soit à 100°C. Pour le traitement à 1200 W, la durée a été limitée à 20 min après avoir atteint 100°C, afin de maintenir une cuisson en excès d'eau. Après traitement, les graines sont égouttées, refroidies immédiatement par ruissellement d'eau à température ambiante pendant 30 sec et essuyés pour éliminer l'eau superficielle.

2.5 Détermination du gain en masse

Après refroidissement, les graines sont égouttées dans une passoire puis du papier absorbant pour éliminer l'excès d'eau superficielle. Le gain en masse des graines ($g / 100 \text{ g}$ de graines) est calculé par la différence entre la masse initiale des graines avant traitement ($M_i ; g$) et la masse après traitement ($M_F ; g$) à l'aide de l'équation 1.

$$GM = 100 (M_F - M_i) / M_i \quad (1)$$

2.6 Mesure de la dureté

La texture des graines est mesurée à l'aide d'un texturomètre TA-XTplus (Stable Micro Systems Ltd, Surrey, UK). La mesure est réalisée graine à graine, avec une pointe cylindrique métallique à bout plat (1 mm de diamètre) à l'aide d'un test de pénétration en 3 étapes. (i) Déplacement de la sonde à 1 mm/sec jusqu'à une déformation de 10% de la hauteur initiale du grain, pour évaluer la texture de la couche superficielle du grain (mesure de la force (N) à 10%) ; (ii) La sonde est maintenue à la déformation de 10% pendant 20 sec ; (iii) Une 2^{nde} déformation à 90% de la hauteur initiale du grain pour mesurer la force de rupture (N) du grain. Les mesures sont réalisées sur 10 graines décortiquées (le cotylédon).

3. Résultats et discussion

3.1 Cuisson "classique" sur plaque chauffante

3.1.1 Le transfert de chaleur

L'immersion des graines de pois chiches dans un excès d'eau peut être décrite comme un milieu granulaire immergé dans une phase liquide continue. Les graines hydratées sont caractérisées par un diamètre moyen de $0,93 (\pm 0,05)$ cm, une surface spécifique de $(4,75 \text{ cm}^2 / \text{g})$ et une sphéricité de $0,86$. Pour la cuisson classique, les transferts de chaleur se déroulent en plusieurs phases : (i) le chauffage de l'eau par contact avec la base du bécher déposé sur la plaque chauffante ; (ii) des transferts rapides de chaleur par convection naturelle au sein de l'eau dans le bécher ; (iii) un échange thermique entre l'eau et la surface des graines ; (iv) des transferts de chaleur par conduction thermique dans les graines. La vitesse du transfert de chaleur dans les graines dépend de plusieurs facteurs : de la vitesse de chauffage de l'eau dans le bécher, du coefficient global d'échange thermique entre l'eau et la surface des graines, du rayon et des caractéristiques thermophysiques des graines. Pour le système de cuisson sur plaque chauffante, la vitesse de montée en température de l'eau jusqu'à 100°C a été mesurée à $3,46 (\pm 0,39) ^\circ\text{C}/\text{min}$ (Figure 2). Il n'est pas observé de différence de température entre les deux sondes. Dans les conditions testées, il faut environ 21 min pour que l'eau atteigne 100°C . En raison des mécanismes endothermiques d'évaporation de l'eau, la température du milieu se stabilise à 100°C pendant la durée du traitement.

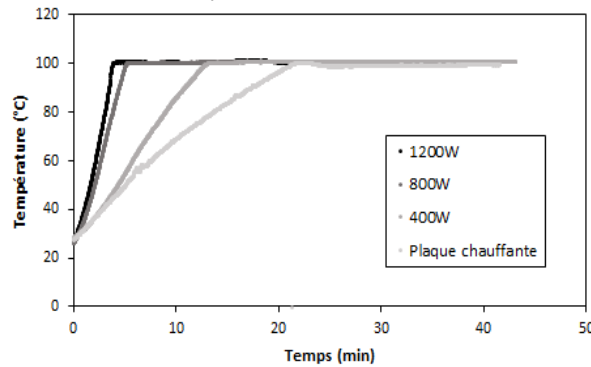


Figure 2. Profil de température au cours du procédé de trempage-cuisson des grains en excès d'eau.

3.1.2 Impact de la cuisson sur les caractéristiques du grain

La cuisson classique des graines de pois chiche se traduit par une variation cinétique du gain en masse et de la texture des graines. Le gain en masse des graines traduit les mécanismes d'absorption d'eau au cours de la cuisson. La vitesse de gain en masse n'est pas constante pendant la durée du traitement (Figure 3-a). Lorsque la température de l'eau s'approche de 100°C , la vitesse de gain en masse augmente. Lorsque la température se stabilise à 100°C et pour des durées longues de traitement (supérieures à 30 min), la vitesse de gain en masse diminue légèrement et le gain en masse semble converger vers un plateau. Les graines de pois chiche s'approchent de leur capacité maximale d'absorption d'eau et un équilibre s'établit entre les mécanismes de gain en eau et les mécanismes de perte de matière sèche dans l'eau de cuisson.

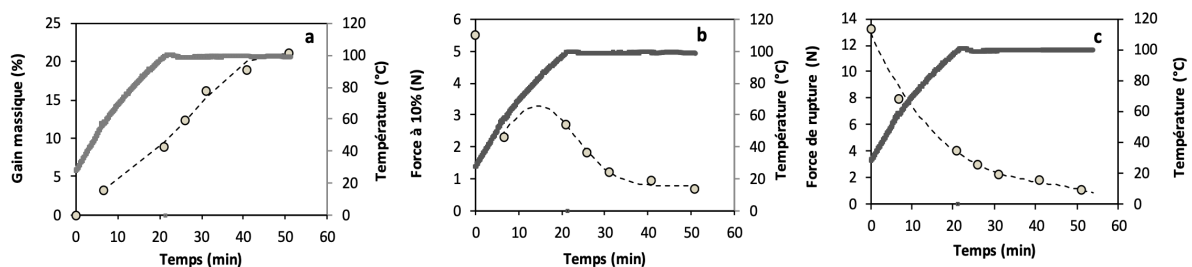


Figure 3. Données expérimentales (cercles) et modèle (pointillée) pour le gain massique (a), la force à 10% (b) et la force de rupture (c). La température mesurée (ligne continue) correspond au traitement batch.

La cuisson a un effet significatif sur la texture des graines. La description de la cinétique de variation de la force à 10% montre une valeur initiale de $5,5 \text{ N}$ pour les graines hydratées. La valeur diminue à $2,3 \text{ N}$ après 7 min de cuisson (l'eau est à 60°C), puis augmente légèrement à $2,7 \text{ N}$ après 21 min (l'eau est à 100°C).

Au-delà de 21 min, la force à 10% diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur seuil de 0,7 N après 51 min de cuisson, soit 12% de sa valeur initiale (Figure 3-b).

Pour les valeurs de force de rupture des graines, les pois chiches hydratés ont initialement une force de rupture d'environ 12,8 N. Les valeurs de force à la rupture diminuent de manière monotone en fonction du temps de cuisson, contrairement aux valeurs de la force à 10%. Après 7 min de cuisson, la valeur de force de rupture est réduite à 59% de la valeur initiale et continue à décroître jusqu'à atteindre seulement 8% de sa valeur initiale après 51 min de cuisson (Figure 3-c).

3.2 Cuisson par traitement micro-ondes

3.2.1 Les transferts de chaleur

Au cours du traitement micro-ondes, l'énergie de l'onde électromagnétique est convertie en chaleur au sein du matériau. Les graines de pois chiches sont traitées en excès d'eau. Des essais préliminaires ont montré que les mesures de température réalisées au cœur des graines ne sont pas répétables en raison de la difficulté à fixer la sonde dans le grain sans pénétration d'eau pendant le traitement et du mouvement convectif des graines dans l'eau qui rendent difficile les mesures. Le dispositif expérimental actuel ne permet pas de mesurer la température à l'intérieur des graines.

L'énergie micro-ondes fournie aux graines est absorbée par les molécules dipolaires, notamment les molécules d'eau présentes à l'intérieur et à l'extérieur des graines. Ces molécules s'agitent par absorption des ondes électromagnétiques et génèrent une friction responsable de l'élévation de température. Ce mécanisme de chauffage volumétrique permet d'atteindre des vitesses élevées de chauffage, réduisant considérablement le temps nécessaire pour atteindre 100°C (Figure 2). Avec le dispositif expérimental utilisé (Figure 1), le traitement de chauffage par ondes électromagnétiques est réalisé dans une cavité multimode, avec des phénomènes d'absorption et de réflexions d'ondes par les parois métalliques et le produit. L'absorption de la puissance émise dans le produit dépend de la profondeur de pénétration des ondes dans le milieu (liée aux propriétés diélectriques) et peut conduire à une hétérogénéité de valeurs de température. Comme pour le chauffage conventionnel, lorsque l'eau arrive à la température d'ébullition, le système s'autorégule et la température reste proche de 100°C.

Lors de la montée en température, des différences de température ont été observées entre les deux sondes (en fonction de leur position dans le récipient). Les différences mesurées sont de 3,64 ($\pm 1,61$) °C à 400 W, de 5,06 ($\pm 2,01$) °C à 800 W et de 6,40 ($\pm 5,62$) °C à 1200 W. Plus la vitesse de chauffage est élevée, plus la température est hétérogène au sein du milieu. A l'inverse, lorsque la température du milieu atteint 100°C, la distribution de la température est plus homogène : la différence de température moyenne entre les 2 sondes est moins importante (1,14 ($\pm 0,52$) °C), quelle que soit la puissance appliquée.

La cinétique de montée en température peut être décomposée en 2 phases (Figure 2). Dans un 1^{er} temps, la température augmente de façon presque linéaire, puis la température se stabilise aux alentours de 100°C. Une augmentation de la puissance (de 400 à 1200 W) se traduit par une augmentation de la vitesse de montée en température (de 5,58 ($\pm 0,29$) à 14,5 ($\pm 0,21$) °C/min). De manière logique, des puissances plus élevées permettent au milieu granulaire d'atteindre plus rapidement le palier à 100°C. La température est homogénéisée plus rapidement et le processus de cuisson est accéléré. Dans ces conditions, une durée de traitement inférieure est nécessaire pour obtenir une faible force de rupture.

3.2.2 Impact de la cuisson sur les caractéristiques des graines

Pour le traitement micro-ondes des graines aux 3 puissances étudiées (400, 800 et 1200 W), la valeur de la force à 10% diminue fortement (de 5,5 à 3 N) pendant les premières minutes du chauffage (Figure 4). A faible puissance (400 W), le surface des grains subit un durcissement lorsque la température est comprise entre 60 et 100°C (Figure 4-b). Ce phénomène devient moins important à puissance élevée comme à 1200 W (Figure 4-d). Sur cette plage de température entre 60 et 100°C, une augmentation de la puissance (de 400 à 1200 W) se traduit par une diminution de la force à 10% de 4,3 à 3,1 N (Figure 4). Le pic de durcissement peut être associé au mécanisme de gélatinisation de l'amidon. Les pois chiches ont une température de début de gélatinisation d'environ 60°C et une température de fin de gélatinisation d'environ 120°C, ces valeurs variant en fonction de la teneur en eau des graines (Lefèvre *et al.*, 2021). L'apparition de ce pic dépend de la vitesse de chauffage. Une augmentation de la puissance (de 400 à 1200 W) induit l'apparition du pic pour des temps courts de traitement (de 5,1 à 3,1 min). La durée et l'intensité du pic est également influencée par la puissance émise des micro-ondes. Pour tous les traitements, lorsque la température d'eau atteint le plateau de 100°C, la force à 10% diminue et se stabilise autour de 1,0 N. La

diminution de la dureté pourrait être associée aux mécanismes de transition vitreuse à chaud de l'amidon pendant le traitement.

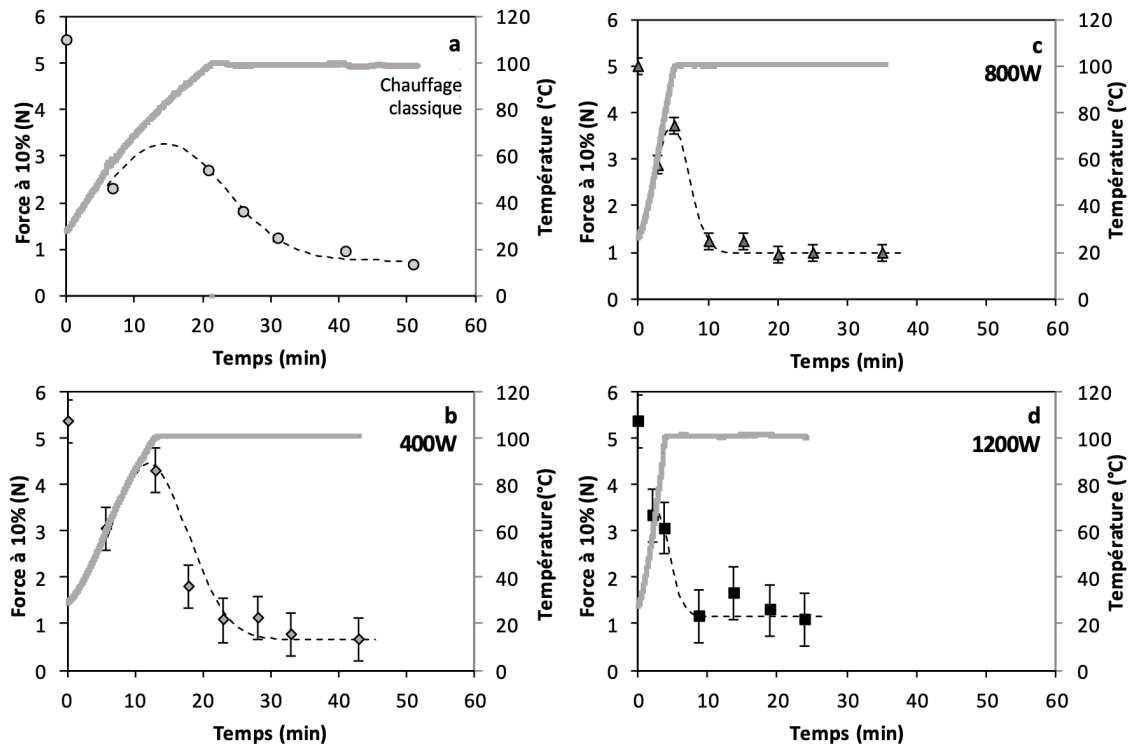


Figure 4. Données expérimentales et prédites pour la force à 10% à différents traitements. La température mesurée (ligne grise continue) correspond au traitement batch.

Contrairement à la force à 10%, la force de rupture n'augmente pas pendant la phase de chauffage jusqu'à ce que la température de 100°C soit atteinte. L'allure de la courbe de variation de la force de rupture est similaire pour la cuisson classique et pour le traitement micro-ondes à 400W (Figure 5-a et 5-b). A l'inverse, les courbes pour les traitements micro-ondes à puissance élevée (800 ou 1200 W) sont différentes (Figure 5-c et 5-d). À 800 W, la force de rupture diminue jusqu'à une valeur de 2,6 N pour un traitement de 15 min, puis augmente jusqu'à une valeur de 6,7 N après 35 min de traitement. À 1200 W, la force de rupture diminue jusqu'à une valeur de 3,2 N pour un traitement de 9 min de cuisson et augmente jusqu'à une valeur de 7,7 N après 24 min. En parallèle, le gain massique atteint son maximum de 11,2% après 15 min à 800 W et de 12,4% après 14 min à 1200 W (Figure 5-g et 5-h). Les augmentations de gain massique semblent corrélées à la diminution de la force de rupture.

L'essai à 400W montre une diminution du gain massique au-delà de 30 min, malgré une diminution de la force de rupture (Figure 5-f). La perte de solides solubles ne doit pas être négligée. Pour mieux comprendre ces phénomènes, des analyses supplémentaires de la teneur en matières solubilisées dans l'eau de cuisson et de la teneur en eau des graines de pois chiches sont en cours de réalisation. Pour expliquer les mécanismes associés au traitement sur plaque chauffante et par micro-ondes à faible puissance (400 W), nous faisons l'hypothèse qu'au début de la cuisson, l'eau pénètre dans le grain au niveau des organisations moléculaires amorphes, l'eau crée des liaisons hydrogène avec les constituants et joue un rôle de plastifiant en augmentant le volume des granules d'amidon et en diminuant la dureté des graines. Le traitement au-delà de la température de début de gélatinisation conduit à la formation d'un gel. La température de l'eau à l'extérieur de la graine reste stable à 100°C, grâce au phénomène endothermique d'évaporation. Dans les graines, les chaînes d'amylose et d'amylopectine continuent à se dissocier. Les graines deviennent plus molles et la perte de matières solubles augmente. Si le processus de cuisson n'est pas arrêté, les graines commencent à se "solubiliser" partiellement dans l'eau jusqu'à former une "purée".

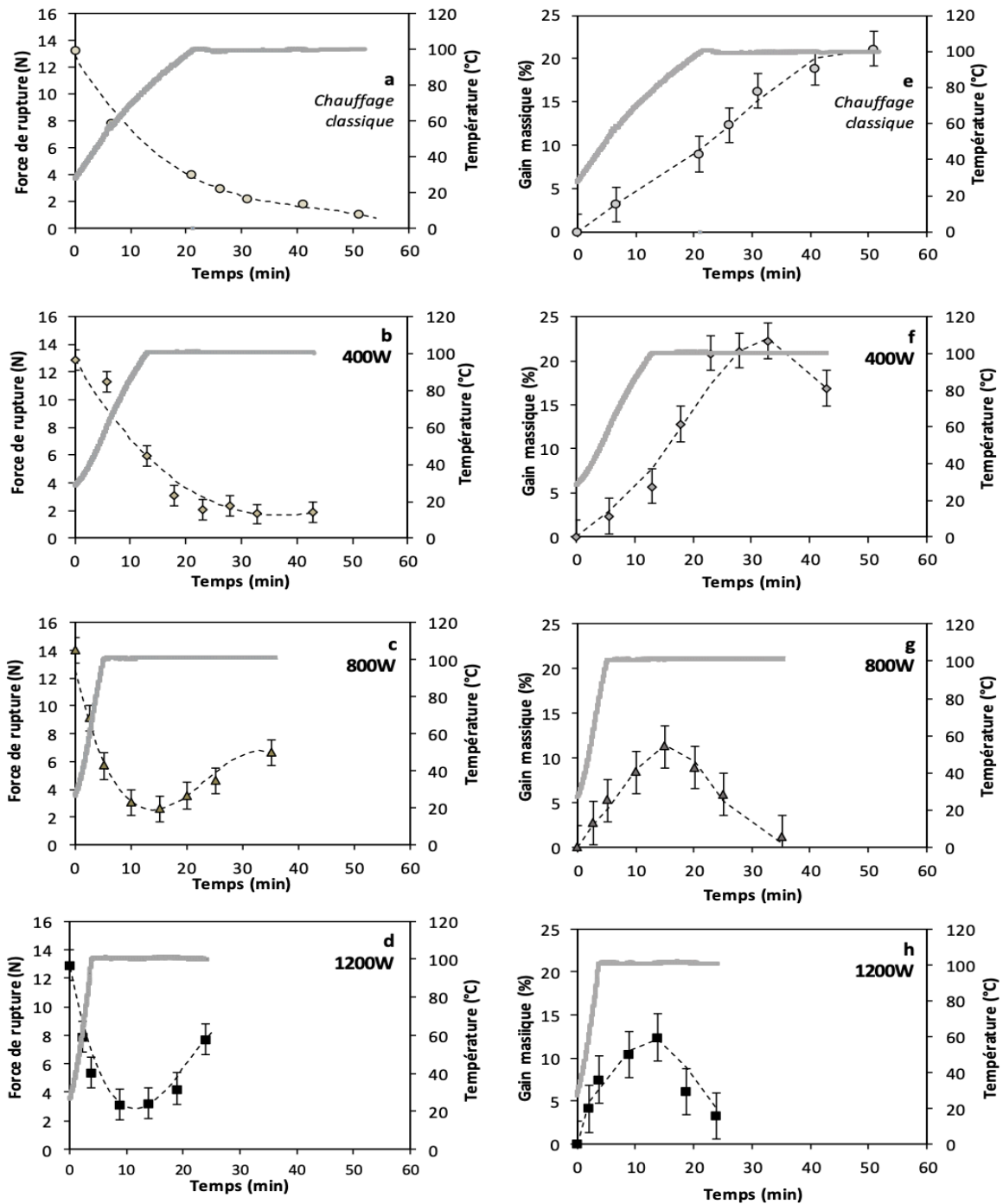


Figure 5. Données expérimentales (cercles), profil de température mesuré (ligne continue grise), modèle (ligne pointillée) de la force de rupture et du gain massique, au cours de la cuisson.

Pour le traitement par micro-ondes à 800 et 1200 W, plusieurs mécanismes de chauffage entrent en jeu simultanément, ainsi que le transfert de masse. Les hypothèses suivantes ont été proposées pour expliquer les phénomènes observés sur la figure 5. (i) Un transfert de chaleur par convection (dans l'eau). (ii) Un transfert de chaleur par conduction (dans la graine). (iii) Une production de chaleur par conversion de l'énergie électromagnétique dans le milieu granulaire. (iv) L'eau pénètre dans la graine au début du processus de chauffage jusqu'à une teneur en eau maximale (Figure 5-g-h). (v) Une éventuelle déshydratation au cœur de la graine pourrait se produire.

L'énergie des micro-ondes est convertie en chaleur dans le volume de la graine. La génération de chaleur dépend de la puissance dissipée dans le produit par les propriétés diélectriques des graines (Albuquerque *et al.*, 2021). Pour les traitements micro-ondes à haute puissance, nous faisons l'hypothèse

que la température interne des graines pourrait dépasser 100°C et que des réactions de dénaturation des constituants (dont les protéines) pourraient se produire, ainsi que des mécanismes de déshydratation. Les graines de pois chiches sont composées d'environ 25% de protéines, dont plus de la moitié sont des protéines globulaires. Celles-ci forment facilement des gels lorsqu'elles sont dénaturées dans une solution aqueuse en formant des liaisons avec d'autres protéines (Day, 2013). Lorsqu'elles sont chauffées au-dessus de leur température de gélification, les protéines ont tendance à former des agrégats (Heramansson, 1986). Une température de traitement supérieure à 100°C pourrait entraîner une réduction significative de la capacité de rétention d'eau du gel formé par rapport à un gel formé à une température inférieure. Ceci est dû au fait que les protéines s'agrègent et que le nombre de liaisons hydrogène avec les molécules d'eau diminue. Les pertes de masse observées à des puissances élevées (Figure 5-g et 5-h) pourraient ainsi être liées à un niveau important de dénaturation des protéines, conduisant au départ de l'eau de l'intérieur du grain.

3.3 Modélisation de la dureté par traitement

A partir des données expérimentales, des modèles ont été proposés pour décrire les phénomènes de cuisson des graines de légumineuses et notamment les variations des profils de dureté des graines, pour les différents traitements par micro-ondes.

Pour décrire la texture de surface (force à 10% ; N) en fonction du temps de cuisson (t ; min), un modèle exponentiel à 4 paramètres est proposé (équation 2) :

$$F(10\%) = A - B \cdot (1 - \exp(-C \cdot (t-D)^2)) \quad (2)$$

Avec : A décrit la hauteur du pic de la courbe, A-B la limite à l'infini, C est proportionnel à l'écart type ; D est l'espérance. Pour la force à 10%, le modèle ne prend pas en compte les points correspondants au traitement thermique à une température inférieure à 60°C.

Pour décrire la force de rupture (N) en fonction du temps de cuisson (t ; min), un modèle polynomial de degré 3 est proposé (équation 3) :

$$F(rup) = A \cdot t^3 + B \cdot t^2 + C \cdot t + D \quad (3)$$

3.4 Estimation des paramètres du modèle

Pour chaque modèle, les paramètres ont été déterminés à l'aide de la fonction "courbe de tendance" d'Excel (Microsoft® Excel® 2016 MSO) en minimisant le R² entre les valeurs mesurées et calculées (tableau 1).

Tableau 1. Équations des paramètres du modèle de la force de 10% et de la force de rupture avec le coefficient de régression entre les valeurs mesurées et calculées. Avec P, la puissance émise (W).

	Equation	Coefficient de regression (R ²)
Force à 10%	A = 0,1148.D + 3,0865	0,9882
	B = -0,0019.P + 4,4819	0,9632
	C = 9E-05.P - 0,0308	0,9855
	D = 13,03 - 9,45 (1 - e ^{-0,0046 (P - 400)})	1
Force de rupture	A = 1E-09.P ² - 4E-06.P + 0,0015	1
	B = -1E-07.P ² + 0,0003.P - 0,0949	1
	C = 2E-06.P ² - 0,0048.P + 0,9085	1
	D = 12,8	

Pour la force à 10%, les paramètres B et C suivent un modèle linéaire en fonction de la puissance. Le paramètre D prédit le temps de montée en température et est modélisé par une fonction gaussienne qui admet comme maximum le point final d'arrivée à 100°C. Le paramètre A dépend du temps de montée en température (qui correspond au paramètre D).

Pour la force de rupture, les paramètres A, B et C suivent un modèle polynomial de degré 2. Cela permet une prédiction plus cohérente des paramètres qu'un modèle linéaire. Le paramètre D représente le point de croisement de la courbe sur l'axe des ordonnées et correspond à la force de rupture des graines hydratées. Il est constant et est calculé comme la moyenne de la force de rupture des graines non cuites.

3.5 Validation du modèle

Pour tester les modèles, des expériences complémentaires de traitement micro-ondes ont été réalisées à 1000 W, dans les mêmes conditions que celles utilisées pour construire les modèles. Les données expérimentales sont comparées aux données calculées (Figure 6). Les résultats montrent l'adéquation des modèles pour la prédiction de la force de 10 % (somme des écarts = 0,92 ; $R^2 = 0,96$) et de la force de rupture (somme des écarts = 3,58 ; $R^2 = 0,95$). Les modèles sont cohérents et décrivent les courbes de dureté pendant le traitement, sur une gamme de puissance entre 400 et 1200 W.

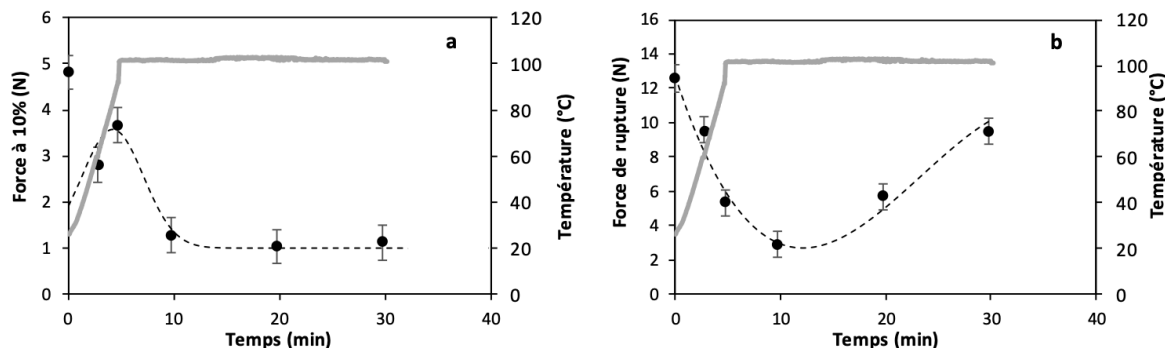


Figure 6. Données expérimentales (cercles), profil de température mesuré (ligne continue grise) et modèle (ligne pointillée) de la force à 10% (a) et de la force de rupture (b), au cours de la cuisson à 1000 W.

4. Conclusion

Des modèles ont été proposés pour décrire les variations de la texture des graines de pois chiches au cours de la cuisson en excès d'eau sur une plaque chauffante ou par traitement micro-ondes (à des puissances comprises entre 400 à 1200 W). Ces modèles ont été construits à l'aide d'équations multi-paramètres ajustées aux données expérimentales et ont été validés par un traitement à 1000 W. Ce ne sont pas des modèles n'ont physique ou physico-chimique des réactions. Dans les conditions de notre étude, ces modèles pourraient permettre d'ajuster les paramètres de cuisson par micro-ondes pour viser une dureté cible, en proposant un temps de traitement adapté. Pour viser une dureté faible, un traitement à faible puissance sur une durée longue est adapté. A l'inverse, les niveaux de puissance élevés n'offrent qu'une courte plage de temps pour maîtriser le processus de cuisson. Les résultats montrent que l'évolution de la dureté est fortement liée à l'évolution de la prise de masse. Il est possible d'approcher le comportement de perte de dureté en pesant simplement les grains avant et après le traitement de cuisson. Cette étude pourra être étendue pour définir le temps de cuisson adaptée pour le traitement de graines de légumineuses en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques et de la puissance utilisée pour le traitement micro-ondes.

5. Références bibliographiques

- ALBUQUERQUE, C. D. ; CURET, S. ; BOILLEREAUX, L. Influence of heating rate during microwave pasteurization of ground beef products : Experimental and numerical study. *Journal of Food Process Engineering*. 44, 2021, 1-17.
- ALBUQUERQUE, C. D. ; CURET, S. ; BOILLEREAUX, L. Microwave processing of food samples : influence of cavity design and dielectric properties. *17th International Conference on Microwave and high frequency heating*, Valencia, Spain, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/Ampere2019.2019.9911>
- BERRIOS, J. D. J. ; SWANSON, B. G. ; CHEONG, W. A. ; Physico-chemical characterization of stored black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Food Research International*. 32, 1999, 669-676.
- DAY, L. ; Proteins from land plants and potential resources for human nutrition and food security. *Trends in Food Science & Technology*. 32, 2013, 25 - 42.
- HERMANSSON, A. M. Soy protein gelation. *Journal of American Oilchemist's society*. 63, 1986, 658 – 667.
- LEFEVRE, C. ; BOHUON, P. ; AKISSOE, L. ; OLLIER, L. ; MATIGNON, B. ; MESTRES, C. Modeling the gelatinization-melting transition of the starch-water system in pulses (lentil, bean and chickpea). *Carbohydrate Polymers*. 264, 2021, 117983.
- POMERAI, D. I. ; SMITH, B. ; DAWE, A. ; NORTH, K. ; SMITH, T. ; ARCHER, D. B. ; DUCE, I. R. ; JONES, D. ; CANDIDO, E. P. M. Microwave radiation can alter protein conformation without bulk heating. *FEBS Lett*. 2003, 543 : 93–97.