

Formulation d'un produit à base de biomasse fraîche de spiruline et étude de la cuisson ohmique dans le but d'une utilisation en milieu spatial

Auteur : Cooper, May-Lee

Promoteur(s) : Goffin, Dorothée

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : chimie et bioindustries, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21304>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**FORMULATION D'UN PRODUIT A BASE DE
BIOMASSE FRAICHE DE SPIRULINE ET
ETUDE DE LA CUISSON OHMIQUE DANS LE
BUT D'UNE UTILISATION EN MILIEU
SPATIAL**

MAY LEE COOPER

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN CHIMIE ET BIOINDUSTRIES**

ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024

PROMOTRICE : PROF. DOROTHEE GOFFIN

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech

Le présent document n'engage que son auteur

**FORMULATION D'UN PRODUIT A BASE DE
BIOMASSE FRAICHE DE SPIRULINE ET
ETUDE DE LA CUISSON OHMIQUE DANS LE
BUT D'UNE UTILISATION EN MILIEU
SPATIAL**

MAY LEE COOPER

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN CHIMIE ET BIOINDUSTRIES**

ANNEE ACADEMIQUE 2023-2024

PROMOTRICE : PROF. DOROTHEE GOFFIN

Remerciements

Je tiens à remercier ma promotrice, Dorothée Goffin, pour m'avoir accueilli au sein du Smart Gastronomy Lab, pour ses conseils avisés et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce travail.

Je souhaite également adresser ma gratitude à Mathieu pour son accompagnement et son soutien constants tout au long de ce projet. Un merci tout particulier pour ton aide précieuse en statistiques.

Je remercie chaleureusement toute l'équipe du Smart Gastronomy Lab qui m'a toujours accueillie avec une bonne humeur et une ambiance de travail des plus agréables. Un merci spécial à Jeanne et Dorian pour le partage de connaissances dans le cadre de notre projet commun.

Je tiens également à remercier Christophe Blecker pour m'avoir donné accès aux appareils de son laboratoire et je souhaite en particulier remercier Lynn, qui a pris de son temps pour m'expliquer le fonctionnement de ces appareils.

Enfin, je n'oublie pas d'exprimer toute ma reconnaissance à ma famille et à mes amis pour leur soutien indéfectible. Leur présence à mes côtés a été une source de motivation et d'encouragement inestimable.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche en collaboration avec l'ESA, visant à développer un aliment adapté aux missions spatiales de longue durée. La spiruline, une microalgue riche en protéines, vitamines et minéraux, est considérée comme une source alimentaire prometteuse en raison de ses propriétés nutritionnelles et de sa capacité à être cultivée dans des environnements contrôlés, la rendant particulièrement adaptée pour l'alimentation des astronautes.

La première phase de cette étude a consisté en la caractérisation de la biomasse fraîche de spiruline pour comprendre ses propriétés thermiques, colorimétriques et rhéologiques. Les résultats ont montré que la spiruline voit ses protéines se dénaturer aux alentours de 67°C, et que cette dénaturation se traduit par une viscosité plus élevée à 80°C qu'à 60°C et 35°C. La spiruline fraîche conserve mieux ses pigments comparé à la spiruline sous forme de poudre et pourrait être facilement intégrée dans des recettes de par son comportement rhéofluidifiant.

Ensuite, plusieurs formulations de burgers ont été testées pour évaluer l'impact de la biomasse fraîche contre la biomasse sous forme de poudre. Les burgers préparés avec de la spiruline fraîche ont montré des couleurs plus claires et des valeurs de texture plus faibles, tandis que ceux à base de poudre présentaient des couleurs plus sombres et des textures plus fermes.

Enfin, l'étude a exploré différentes méthodes de cuisson, avec une attention particulière sur la cuisson ohmique. Cette méthode a démontré un potentiel intéressant par rapport aux méthodes conventionnelles pour produire des burgers avec une texture prometteuse. Les deux tensions testées (50V et 150V) semblent donner des textures similaires, mais montrent des différences significatives en termes de temps de cuisson, donnant l'avantage à la cuisson à 150V.

L'influence des protéines végétales texturées et de la concentration en sel sur le processus de cuisson ohmique ont également été examinées, montrant que ces paramètres peuvent être ajustés pour affiner la qualité du produit final.

Cette recherche souligne l'intérêt de la spiruline fraîche comme base pour des aliments destinés à l'environnement spatial et met en avant la cuisson ohmique comme une méthode encourageante pour optimiser la qualité texturale des produits.

Abstract

This work is part of a research project in collaboration with ESA, aiming to develop a food product suitable for long-duration space missions. Spirulina, a microalga rich in proteins, vitamins, and minerals, is considered a promising food source due to its nutritional properties and its ability to be cultivated in controlled environments, making it particularly suitable for astronaut nutrition.

The first phase of this study involved the characterization of fresh spirulina biomass to understand its thermal, colorimetric, and rheological properties. The results showed that spirulina proteins denature around 67°C, leading to higher viscosity at 80°C compared to 60°C and 35°C. Fresh spirulina better retains its pigments compared to spirulina in powder form and might be easily integrated into recipes due to its shear-thinning behavior.

Subsequently, several burger formulations were tested to evaluate the impact of fresh biomass versus powder biomass. Burgers made with fresh spirulina exhibited lighter colors and lower texture values, while those made with powder showed darker colors and firmer textures.

Finally, the study explored different cooking methods, with a particular focus on ohmic cooking. This method demonstrated interesting potential compared to conventional methods for producing burgers with a promising texture. The two tested voltages (50V and 150V) yielded similar textures but showed significant differences in cooking time, with an advantage for cooking at 150V. The influence of texturized vegetable proteins and salt concentration on the ohmic cooking process was also examined, showing that these parameters can be adjusted to refine the final product's quality.

This research highlights the potential of fresh spirulina as a base for space-bound food products and emphasizes ohmic cooking as an encouraging method to optimize the nutritional and textural quality of these products.

Abréviations

PVT = protéines végétales texturées

ESA = european space agency

NASA = national aeronautics and space administration

OMS = organisation mondiale de la santé

g = gramme

s = seconde

cm³ = centimètre cube

cm = centimètre

V = volt

MS = matière sèche

mS = millisiemens

Hz = hertz

rpm = rotation par minute

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : caractéristiques de la biomasse utilisée dans le cadre des expérimentations | 24 |
| Tableau 2 : liste et provenance des ingrédients utilisés pour la fabrication des burgers | 24 |
| Tableau 3 : liste du matériel utilisé pour la fabrication des burgers | 25 |
| Tableau 4 : proportions des ingrédients en fonction de la biomasse utilisée et des conditions d'expérimentation..... | 26 |
| Tableau 5 : conditions de l'expérimentation 1 | 27 |
| Tableau 6 : Paramètres de couleur de la poudre de spiruline et de la spiruline fraîche en fonction de la température et du prétraitement. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3)..... | 34 |
| Tableau 7 : valeurs de la masse, de la géométrie et de l'humidité des burgers avant cuisson en fonction des conditions de préparations. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). 36 | |
| Tableau 8 : Valeurs des paramètres de couleur des burgers de spiruline avant cuisson en fonction des conditions de préparation. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). . | 37 |
| Tableau 9 : différences de géométrie et pertes en eau entre les burgers avant et après cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3)..... | 38 |
| Tableau 10 : différence des paramètres de couleur et changement total de la couleur entre les burgers avant et après cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3)..... | 39 |
| Tableau 11 : Valeurs de la masse, de la géométrie et de l'humidité des burgers avant différents modes de cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3)..... | 42 |
| Tableau 12 : paramètres physiques des burgers de spiruline en fonction du mode de cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. Pour la poêle, le four et le bain thermostaté (n=3). Pour le four ohmique (n=2)..... | 43 |
| Tableau 13 : paramètres des burgers avec et sans PVT cuits à différents intensités (50V/150V) au four ohmique. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). | 46 |
| Tableau 14 : paramètres des burgers dont la concentration en sel varie de manière linéaire. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=2)..... | 47 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : cycle de MELiSSA | 20 |
| Figure 2 : configuration schématique simplifiée d'un four ohmique | 22 |
| Figure 3 : burgers de spiruline avant cuisson | 27 |
| Figure 4 : configuration du four ohmique | 31 |
| Figure 5 : électrodes et cellule de cuisson..... | 31 |
| Figure 6 : courbes de transition thermique de la biomasse fraîche | 33 |
| Figure 7 : diagramme de la viscosité en fonction de la contrainte de cisaillement pour la biomasse fraîche, prétraitée à l'ULTRA-TURRAX, et chauffée 1 heure à différentes températures. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). | 35 |
| Figure 8 : paramètres de texture des burgers après cuisson en fonction des conditions de préparations. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). | 39 |
| Figure 9 : burger de spiruline en cuisson et burger obtenu après cuisson..... | 43 |
| Figure 10 : burger de spiruline cuit à la poêle (haut/gauche), sous vide (haut/droite), four ohmique (bas/gauche), four (bas/droite) | 44 |
| Figure 11 : paramètres de texture des burgers après différents modes de cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). | 45 |
| Figure 12 : paramètres texturaux des burgers en fonction de la teneur en PVT et de la tension appliquée. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). | 47 |
| Figure 13 : cellule de cuisson du four ohmique contenant la pâte à burger | 48 |
| Figure 14 : paramètres de texture des burgers contenant différentes concentrations en sel et cuits au four ohmique. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3). | 49 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciements | 4 |
| Résumé | 5 |
| Abstract | 6 |
| Abréviations | 7 |
| Liste des tableaux | 8 |
| Liste des figures | 9 |
| ETAT DE L'ART..... | 13 |
| 1 La spiruline | 13 |
| 1.1 Composition | 13 |
| 1.1.1 Glucides..... | 13 |
| 1.1.2 Lipides..... | 13 |
| 1.1.3 Protéines | 14 |
| 1.1.4 Vitamines, minéraux et oligo-éléments..... | 15 |
| 1.2 Milieux et méthodes de culture | 16 |
| 1.3 Nutrition | 16 |
| 1.4 Spiruline fraîche et spiruline sèche : différences et intérêts..... | 17 |
| 1.4.1 Biomasse fraîche | 17 |
| 1.4.2 Biomasse sèche | 18 |
| 1.5 Applications industrielles | 19 |
| 2 Domaine spatial | 19 |
| 3 Cuisson ohmique : principes, avantages et applications..... | 21 |
| OBJECTIF..... | 23 |
| MATERIEL ET METHODES | 24 |
| 1 Caractéristiques de la biomasse | 24 |
| 2 Formulations | 24 |
| 2.1 Ingrédients | 24 |
| 2.2 Recettes | 25 |
| 2.3 Préparation des burgers | 26 |
| 2.3.1 Préparation de la pâte | 26 |
| 2.3.2 Préparation du burger | 27 |
| 2.4 Mesures et traitements réalisées sur la biomasse et les produits..... | 28 |
| 2.4.1 Colorimétrie | 28 |
| 2.4.2 Homogénéisation de la biomasse | 28 |

| | | |
|-------------------------------------|---|-----------|
| 2.4.3 | Dénaturation des protéines | 28 |
| 2.4.4 | Matière sèche..... | 28 |
| 2.4.5 | Pertes de cuisson | 29 |
| 2.4.6 | Pertes en eau..... | 29 |
| 2.4.7 | Géométrie du burger..... | 29 |
| 2.4.8 | Rhéomètre | 29 |
| 2.4.9 | Texturomètre | 30 |
| 2.5 | Cuisson des préparations à base de biomasse | 30 |
| 2.5.1 | Four conventionnel..... | 30 |
| 2.5.2 | Poêle | 30 |
| 2.5.3 | Four ohmique | 30 |
| 2.5.4 | Cuisson bain thermostaté | 32 |
| 3 | Analyse statistique | 32 |
| RESULTATS ET DISCUSSION..... | | 33 |
| 1 | Caractérisation de la biomasse utilisée dans le cadre du travail | 33 |
| 1.1 | Détermination de la température de transition thermique des protéines présentes dans la biomasse étudiée (calorimétrie différentielle à balayage) | 33 |
| 1.2 | Etude du comportement de la biomasse en fonction de la température | 34 |
| 1.2.1 | Analyse colorimétrique | 34 |
| 1.2.2 | Analyse rhéologique..... | 35 |
| 2 | Etude de différentes formulations de pâte à burger en fonction de différentes conditions | 36 |
| 2.1 | Comparaison des burgers avant cuisson..... | 36 |
| 2.2 | Impact de la cuisson | 38 |
| 2.2.1 | Paramètres physiques | 38 |
| 2.2.2 | Paramètres texturaux | 39 |
| 2.3 | Choix de la meilleure formulation | 41 |
| 3 | Etude comparative des cuissons..... | 42 |
| 3.1 | Comparaison des burgers avant cuisson..... | 42 |
| 3.2 | Impact de la cuisson | 43 |
| 3.2.1 | Paramètres physiques | 43 |
| 3.2.2 | Paramètres texturaux | 45 |
| 4 | Cuisson ohmique..... | 46 |
| 4.1 | Influence des PVT | 46 |
| 4.2 | Influence de la concentration en sel | 47 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 4.2.1 Paramètres physiques | 47 |
| 4.2.2 Paramètres texturaux | 49 |
| CONTRIBUTION PERSONNELLE | 50 |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 51 |
| BIBLIOGRAPHIE | 54 |

ETAT DE L'ART

1 La spiruline

Les microalgues représentent un ensemble d'organismes procaryotes et eucaryotes qui partagent certaines spécificités avec les plantes, car elles sont capables de photosynthèse. Parmi les organismes procaryotes, on retrouve les algues bleu-vert, également appelées cyanobactéries, qui représentent l'une des formes de vie les plus primitives sur Terre (1,2). Le nom commun *Spirulina*, ou plus simplement spiruline, est donné aux deux principales espèces de cyanobactéries que sont : *Arthrospira platensis* et *Arthrospira maxima* (1,3,4). Elles appartiennent à la famille des Oscillatoriaceae et prennent généralement la forme de filaments hélicoïdaux bleus-verts de longueur allant de 200 à 300 µm et de largeur allant de 5 à 10 µm (5). Il s'agit de la microalgue la plus cultivée à travers le monde en raison des nombreuses vertus qui lui sont attribuées (6).

1.1 Composition

La spiruline se distingue principalement par sa haute teneur en protéines. Elle est également reconnue comme un aliment complet en raison de sa teneur en glucides et lipides ainsi que pour sa richesse en vitamines et minéraux qui la rendent intéressante d'un point de vue santé (3,5). Globalement, cette cyanobactérie présente un grand pourcentage en protéines par rapport au poids sec contre un faible pourcentage en lipides et en cendres comparé aux microalgues eucaryotes. Cependant, ces pourcentages doivent être interprétés avec précaution car ils sont influencés par les conditions environnementales et de culture ainsi que par les traitements post-récolte (6).

1.1.1 Glucides

La composition en glucides de la spiruline varie entre 15 et 25% du poids sec. Ce pourcentage dépend grandement du milieu de culture et de la source d'azote à disposition de la microalgue. Elle contient très peu de cellulose, mais renferme divers sucres tels que le glucose, le mannose, le galactose ou encore le xylose. En raison de sa faible teneur en cellulose, la spiruline présente l'avantage d'avoir une haute digestibilité ce qui lui confère la possibilité d'être consommée par tout le monde, y compris les personnes âgées et les personnes souffrant de malabsorptions intestinales (2).

1.1.2 Lipides

Les lipides totaux varient entre 5 et 10% du poids sec. La fraction saponifiable représente environ 80% du poids total des lipides et est principalement composée d'acides gras libres (2).

Bien que le profil de ces acides gras varie fortement en fonction de la souche étudiée, après hydrolyse, la spiruline se caractérise toujours par une composition dominée par acides gras polyinsaturés à 18 atomes de carbone. Sa richesse en acides gras essentiels de la série oméga-6 lui confère un avantage biologique particulier (7). En effet, ils sont connus pour avoir des effets bénéfiques sur diverses maladies cardio-vasculaires comme l'athérosclérose ou l'hypertension artérielle (8). La fraction insaponifiable, qui constitue une part plus réduite des lipides, est surtout composée de stérols, de terpènes et d'hydrocarbures saturés à longue chaîne (7).

Une fois de plus, ce pourcentage peut varier considérablement en fonction des conditions de cultures. Par exemple, la production de lipides, notamment de grandes quantités de triacylglycérides, peut se trouver augmentée dans des conditions limitantes d'azote (9,10).

1.1.3 Protéines

Le pourcentage de protéines dans la spiruline varie entre 50 et 70% du poids sec, ce qui en fait une source de protéines importante et l'une des plus riches d'origine microbienne. En effet, elle contient des niveaux de protéines comparables à ceux retrouvés dans les produits d'origine animale ou végétale. A titre de comparaison, les valeurs moyennes de poids frais pour les viandes et les poissons sont de 15-20%, pour le soja environ 35% et pour les œufs environ 12% (11).

La qualité des produits protéinés se mesure par la quantité et la variété d'acides aminés présents ainsi que par la facilité avec laquelle les protéines sont digérées. La spiruline est considérée comme un produit de haute qualité en raison de son contenu riche en acide aminés, notamment de ceux dit essentiels. Ces derniers sont au nombre de neuf et regroupent l'isoleucine (Ile), la leucine (Leu), la lysine (Lys), la méthionine (Met), la phénylalanine (Phe), la thréonine (Thr), le tryptophane (Trp) et la valine (Val) (12). Ils sont appelés essentiels car sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme mais ne peuvent pas être synthétisés par celui-ci (13). Leur proportion dans la spiruline varie entre 38 et 47% du poids total des protéines. Parmi ces acides aminés, la leucine, la valine et l'isoleucine sont ceux présents en plus grande quantité (2,6). La composition en acides aminés est globalement équilibrée, bien que la concentration en tryptophane soit relativement pauvre par rapport à d'autres sources de protéines. Malgré cette faiblesse, l'équilibre général fait de la spiruline un complément nutritionnel avantageux pour l'alimentation humaine (2,3).

La spiruline est également riche en chlorophylle, caroténoïdes et phycobiliprotéines (1,6). Ce sont des composés colorés pouvant être utilisés comme pigments. Même si ces derniers sont moins stables que les composés synthétiques utilisés en industrie, ils ont l'avantage de présenter moins de risques pour la santé et même de montrer certains bienfaits étant donné qu'ils peuvent contenir des vitamines bénéfiques pour le système immunitaire (6). Parmi les phycobiliprotéines qui constituent la famille de pigments majeures des cyanobactéries comme *Arthrospira* sp., la phycocyanine est un composant clé. Cette molécule hydrosoluble, responsable de la couleur bleue de la spiruline, est reconnue pour sa forte activité antioxydante, lui conférant des propriétés anti-inflammatoires et anticancéreuses notables (1,14,15). En terme de configuration, elle est composée de deux sous-unités similaires d'hélices alpha et de feuilletts beta ainsi que d'un chromophore et se retrouve sous la forme de granules larges, représentant plus de 20% du poids sec de la spiruline (16).

1.1.4 Vitamines, minéraux et oligo-éléments

Les vitamines étant des composés sensibles aux traitements thermiques, leur dosage après récolte de la biomasse peut s'avérer complexe. La spiruline est néanmoins composée d'une multitude de vitamines et de minéraux même si, comme pour les macronutriments, les concentrations varient grandement en fonction de la méthode de production, de la géographie, et de la méthode de séchage. La spiruline contient une quantité significative de vitamine B12 et en ce qui concerne les minéraux, elle est une source notable de potassium, magnésium, calcium, sélénium, fer, zinc et d'autres éléments essentiels (17,18). Elle est également riche en caroténoïdes, notamment en bêta-carotène (19). Ce dernier, qui agit comme une provitamine A, est un précurseur de la vitamine A et est présent en grande quantité, pouvant atteindre jusqu'à 1800 mg/kg. En tant qu'antioxydant, il joue un rôle essentiel dans plusieurs fonctions biologiques, notamment le mécanisme de la vision. De plus, il a un effet bénéfique sur la santé de la peau et le système immunitaire (20).

1.2 Milieux et méthodes de culture

La spiruline se développe naturellement dans les eaux tropicales et subtropicales des régions chaudes, où la concentration en sel et en bicarbonates est élevée (1,4). Dans ces lacs alcalins elles se retrouvent sous la forme de grandes populations de filaments verts spiralés de nombre variables en fonction de la souche (1).

Pour une production optimale, le milieu de culture des cyanobactéries est crucial. En effet, plus les conditions de culture sont contrôlées et optimales, plus la croissance et la qualité nutritionnelle de la spiruline sera grande (3,4).

Deux systèmes de cultures sont couramment utilisés pour la production de microalgues : les systèmes « ouverts » tels que les étangs naturels ou artificiels et les systèmes « fermés » tels que les photobioréacteurs. Les systèmes ouverts sont peu coûteux et faciles à construire, mais présentent plusieurs inconvénients tels qu'une mauvaise assimilation de la lumière, des pertes dues à l'évaporation, une aération insuffisante et un risque élevé de contamination par la faune ou d'autres micro-organismes. Ces facteurs conduisent à une productivité souvent plus faible, avec une croissance influencée par des paramètres comme la localisation, la température et le pH. En revanche, les photobioréacteurs offrent de nombreux avantages grâce à leur environnement fermé et contrôlé. En minimisant les échanges avec l'extérieur, ils réduisent considérablement les risques de contamination et permettent un meilleur contrôle des paramètres tels que l'approvisionnement en dioxyde de carbone, la température, l'intensité lumineuse, et plus encore. Cette méthode assure ainsi une productivité accrue et une croissance plus efficace (3).

1.3 Nutrition

La spiruline est consommée depuis des centaines d'années par diverses populations (1,3). C'est principalement les civilisations Maya et Aztèques qui l'utilisaient comme source d'alimentation primaire (21). Aujourd'hui, elle est reconnue comme « Generally Recognised As Safe » par la FDA (US Food and Drug Administration), ce qui confirme sa sécurité pour la consommation humaine (2,3). Sa richesse en protéines, vitamines et minéraux lui confère le statut de « superfood » faisant d'elle un aliment clé dans la conception de la nourriture du futur (2). C'est pour cette raison que des organismes comme la NASA et l'ESA considèrent de l'utiliser comme source d'alimentation dans les voyages spatiaux à venir (18). Actuellement, la spiruline est retrouvée majoritairement sous forme de poudre, flocons, comprimés, ou capsules et donc principalement à l'état séché (3).

Elle est couramment utilisée en tant que complément alimentaire ou en supplémentation dans divers produits alimentaires. Par exemple, elle peut être ajoutée à la formulation de pâtes ou de biscuits afin de booster la disponibilité en protéines ou en vitamines (2).

Les déficiences en micronutriment les plus communes sont associées au fer, à la vitamine D, au zinc et à la vitamine B12 (22). La vitamine B12 est indispensable pour la production de globules rouges et le maintien de la santé neurologique. Elle est surtout présente dans les produits d'origine animale, ce qui rend sa carence plus courante chez les végétariens et végétaliens. Dans ce contexte, les niveaux de vitamine B12 biodisponibles dans la spiruline sont particulièrement intéressants (18). La spiruline, en tant que source potentielle de vitamine B12, pourrait contribuer à combler cette lacune nutritionnelle. Cependant, il est important de noter que la biodisponibilité et l'efficacité de la vitamine B12 provenant de la spiruline sont encore sujettes à débat. Certaines études suggèrent qu'elle ne pourrait pas être entièrement assimilables par l'organisme, tandis que d'autres indiquent qu'elle pourrait néanmoins être une source utile pour ceux qui ne consomment pas de produits d'origine animale (17,23).

1.4 Spiruline fraîche et spiruline sèche : différences et intérêts

L'intérêt d'incorporer la spiruline dans l'alimentation est surtout due à sa grande concentration en protéines et au fait que les consommateurs sont de plus en plus soucieux de la qualité nutritionnelle et des bénéfices que peuvent avoir les aliments qu'ils ingèrent (24). Il est intéressant de challenger l'utilisation de la spiruline sous forme fraîche et sèche car ces deux formes peuvent donner des produits complètement différents sur le plan nutritionnel, d'acceptabilité et en termes d'incorporation à la nourriture. Chacune des formes possède ses avantages et ses inconvénients.

1.4.1 Biomasse fraîche

Lorsque la biomasse est fraîche, les perceptions sensorielles sont plus appréciées du consommateur. En effet, ne pas faire de traitement thermique permet une conservation des propriétés nutritionnelles et donc une meilleure qualité et quantité en composés bioactifs par rapport à la forme séchée (2,3). Il y a donc peu d'étapes intermédiaires entre la récolte et la consommation ce qui permet un gain de temps et d'énergie (1).

La forme fraîche peut facilement être incorporée dans des matrices alimentaires sans causer trop de changements dans l'odeur et dans la saveur ce qui la rend plus apte à la consommation (1,5). De plus, du point de vue des consommateurs, elle est souvent apparentée aux algues marines ce qui lui confère directement un aspect santé et une image positive liée à la fraîcheur (ex : comme la salade) (5).

En revanche, la biomasse fraîche seule peut présenter une perception visuelle négative. Elle peut être qualifiée par certains d'avoir un « aspect repoussant » ou encore un « aspect pâteux » (5). Après récolte, elle doit être rapidement amenée à de basses températures. Actuellement, il n'y a pas beaucoup d'études sur la forme fraîche, d'un point de vue de la sécurité alimentaire, de la microbiologie et de la stabilité dans des produits alimentaires (1).

1.4.2 Biomasse sèche

Les avantages majeurs de la biomasse sèche (sous forme de poudre) sont une durée de conservation allongée, une facilité de stockage et une intégration simple dans les formulations alimentaires (1). La spiruline à l'état de poudre étant utilisée depuis de nombreuses années, un plus grand nombre d'études est disponible sur les composés bioactifs et sur son intégration dans des matrices alimentaires.

L'inconvénient principal de cette forme séchée est dû aux traitements thermiques qui lui sont appliqués. En effet, ils se font à de hautes températures (>100°C) ce qui a des effets significatifs sur les composés bioactifs de la biomasse (1,2). Par exemple, il peut y avoir une diminution du taux de protéines et du taux de sucres après des traitements comme le chauffage convectif, le chauffage au four ou le chauffage infrarouge (2). Les différentes méthodes de séchages peuvent avoir un impact sur le pourcentage de phycocyanine (perte d'environ 50%) (4).

Les traitements thermiques induisent des réactions chimiques, dépendantes de la température, qui modifient significativement le profil aromatique des molécules de la spiruline par réarrangement des composés volatils (25). Cette altération entraîne des effets notables sur les caractéristiques organoleptiques, notamment une odeur et un goût pouvant être qualifiés de « poissonneux ». Bien que l'incorporation de poudres dans les matrices alimentaires est plus facile, la présence d'arômes indésirables limite les taux appliqués, qui varient entre 2 et 15% (26–28). D'autre part, une distribution non uniforme a été démontrée dans certains produits comme le lait (2).

1.5 Applications industrielles

Lorsqu'elle est utilisée en industrie, la biomasse est traitée thermiquement directement après récolte de sorte à la réduire en poudre. Elle est généralement atomisée, lyophilisée ou séchée à chaud, toujours à des températures dépassant les 100°C. La technique de séchage ainsi que la température appliquée peuvent avoir un effet significatif sur les composés bioactifs de la biomasse. Malheureusement, ce traitement à haute température mène à une perte de la plupart des composés bioactifs dû à l'effet de la chaleur. En effet, les enzymes et les antioxydants sont connus comme étant inhibés ou inactivés lorsque des températures élevées sont atteintes. La plupart des enzymes sont complètement inactifs lorsqu'exposés à des températures proches de 100°C. C'est pour cette raison que l'utilisation de la spiruline sous sa forme fraîche présente un intérêt. Cependant, des challenges sont à dépasser pour assurer la sûreté et l'acceptabilité par le consommateur de consommer ce produit de la même manière qu'un fruit ou un légume du supermarché. L'odeur et la saveur poissonneuse que l'on connaît de la spiruline est le résultat du séchage de cette dernière. L'utilisation de la forme fraîche a comme avantage d'avoir un goût et une odeur à peine remarquable (3).

2 Domaine spatial

La spiruline est déjà utilisée par la NASA en tant que complément alimentaire pour les astronautes (2). En effet, les conditions spatiales confrontent les astronautes à divers facteurs de stress pouvant avoir des effets négatifs sur leur santé. La microgravité et le stress oxydatif induit par les radiations peuvent avoir un impact significatif sur le corps des astronautes. C'est pour contrer ces effets, grâce à ses propriétés antioxydantes remarquables, que la spiruline est mise en avant au sein des stations spatiales. Cependant, les défis alimentaires dans l'espace ne se limitent pas à ces aspects. La qualité des aliments joue également un rôle crucial dans la santé des astronautes. Dans la Station Spatiale Internationale (ISS), les aliments doivent souvent être réhydratés ou cuits car il est impossible de conserver des produits frais à température ambiante. Le manque de nourriture fraîche, comme les fruits ou les légumes, peuvent entraîner des carences en macro et micronutriments essentiels (29).

Dans ce contexte, l'utilisation de la biomasse fraîche présente un intérêt croissant pour les missions spatiales à venir. En incorporant la biomasse directement dans les recettes, sans passer par des étapes de séchage, il serait possible de fournir aux astronautes des aliments frais et nutritifs.

Actuellement, les vaisseaux spatiaux sont réapprovisionnés par des cargos contenant les provisions nécessaires mais ces réapprovisionnements sont coûteux en termes de temps et d'argent. Dans le cadre de futures missions spatiales de longues durées, il est primordial de développer un système autonome de production alimentaire qui garantirait une alimentation suffisante et variée aux astronautes. C'est le cas du projet MELiSSA (Micro-Ecological Life Support Alternative) soutenu par l'ESA (**Figure 1**) qui consiste à développer un système de bio régénération capable de produire de l'eau potable, de l'oxygène ainsi que de la nourriture. L'intérêt de l'incorporation de microalgues telle que *Arthrospira* sp. dans un tel système repose sur le fait que cette dernière est productrice d'oxygène mais peut aussi être source de nourriture riche en vitamines et minéraux ce qui en fait un bon élément à intégrer dans la boucle (30).



Figure 1 : cycle de MELiSSA

3 Cuisson ohmique : principes, avantages et applications

La cuisson est une étape cruciale dans la préparation des aliments, influençant leur sécurité, leur propriété organoleptique et leur valeur nutritive (31). Actuellement, différentes méthodes de cuisson sont employées pour répondre aux besoins variés des consommateurs ainsi qu'aux exigences spécifiques d'environnements particuliers tel que l'espace. Bien que ces méthodes de cuisson demeurent populaires, d'autres techniques plus innovantes offrent un gain de temps et d'énergie significatifs. La cuisson ohmique constitue ainsi une alternative intéressante, tant sur Terre, où les conditions sont bien maîtrisées, que dans l'espace, où la microgravité et les contraintes d'approvisionnement rendent les méthodes traditionnelles moins pratiques (32,33).

La cuisson ohmique est un mode de cuisson basé sur le principe de l'effet Joule qui représente une alternative aux méthodes de cuisson conventionnelles de par son fonctionnement (34–36). Ce principe correspond à une production thermique suite au passage d'un courant électrique dans un matériau conducteur (= matrice alimentaire). La cuisson ohmique est une méthode volumique, tout comme la cuisson micro-onde, qui a déjà montré des bénéfices en terme de gain d'énergie et de temps (37). La cuisson volumique diffère des autres modes de cuissons sur la manière dont la chaleur pénètre dans l'aliment. Elle garantit une cuisson uniforme du produit (33). Cependant, elle se distingue de la cuisson aux micro-ondes par l'utilisation d'électrodes et de fréquences distinctes (38). Parmi ses nombreux avantages, elle permet de prévenir la dégradation des composés thermosensibles, améliorant ainsi la qualité des produits traités. Le chauffage rapide et homogène permet non seulement une réduction des coûts énergétiques, mais aussi une diminution de l'encrassement lors des transformations. De plus, la durée de conservation des aliments traités par chauffage ohmique est comparable à celle des aliments stérilisés en conserve (35). En raison de sa montée rapide en température, de sa distribution uniforme de la chaleur, de l'absence d'inertie thermique après l'extinction de l'alimentation électrique et de son rendement élevé de conversion de l'électricité en chaleur, la cuisson ohmique est particulièrement prisée dans les processus de stérilisation et de pasteurisation (34,38). Contrairement aux techniques conventionnelles, qui peuvent entraîner des temps de chauffage prolongés et une perte potentielle de qualité, en particulier pour les produits visqueux, la cuisson ohmique offre une alternative plus efficace et de meilleure qualité (39). Il est à noter que de nombreux paramètres influencent le processus de cuisson ohmique, tels que la taille des particules, la concentration, l'intensité du champ électrique et surtout la conductivité électrique. Ce dernier paramètre, crucial dans ce procédé, augmente de manière linéaire avec la conductivité de l'aliment, la température et la quantité d'eau présente dans celui-ci.

C'est également la raison pour laquelle les aliments solides sont moins perméables à la conductivité électrique que les liquides. La conductivité de l'aliment est, quant à elle, affectée par la concentration, l'intensité du courant et la température (38,40).

Les principales composants du four sont les électrodes, une source de courant alternatif, une unité de contrôle de l'intensité ainsi qu'un système permettant l'enregistrement des données (40). Les électrodes sont reliées aux produits selon deux manières possibles. Soit par contact direct, soit par couplage via un milieu conducteur. Dans ce dernier cas, le produit n'est pas en contact direct avec les électrodes mais à travers un milieu conducteur qui permet de transmettre le courant. Les cuissons peuvent s'effectuer en batch ou en flux continu. Ce dernier est principalement utilisé en industrie car souvent utilisé comme procédé de stérilisation/pasteurisation pour des matrices liquides alors que le mode batch est plus commun dans des contextes de recherche ou de productions à petite échelle (39,41).

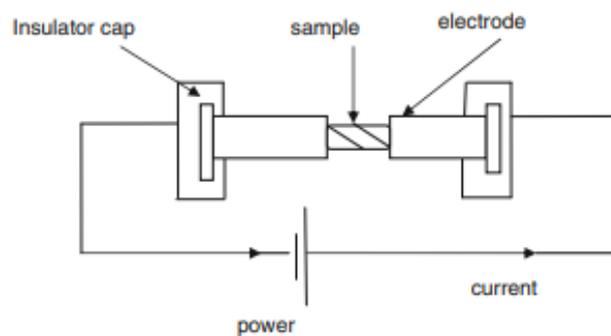


Figure 2 : configuration schématique simplifiée d'un four ohmique (35)

OBJECTIF

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est de développer une formulation innovante d'un produit alimentaire à base de biomasse fraîche de spiruline, en mettant particulièrement l'accent sur l'optimisation des procédés de fabrication et de cuisson pouvant être potentiellement adaptés à un usage en milieu spatial. Pour ce faire, différentes étapes sont entreprises. Tout d'abord, la caractérisation de la biomasse qui sert à identifier et analyser les propriétés de la biomasse afin de comprendre son comportement lors des différentes étapes de transformation. Ensuite, la comparaison des formes de spiruline qui permet d'évaluer les différences entre l'utilisation de biomasse fraîche et de poudre dans la formulation des burgers, tout en tenant compte de l'impact des variables de préparation sur la qualité du produit final. Un focus sur les méthodes de cuisson, incluant cuissons conventionnelles et cuisson ohmique, est effectué afin de comparer les effets de celles-ci sur le produit fini. Enfin, un travail sur l'optimisation de l'utilisation du four ohmique est réalisé dans le but d'en déterminer les paramètres optimaux.

MATERIEL ET METHODES

1 Caractéristiques de la biomasse

La biomasse utilisée dans le cadre du travail provient de la société « Etika Spirulina ». Les différentes informations la concernant sont reprises dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : caractéristiques de la biomasse utilisée dans le cadre des expérimentations

| Etika Spirulina | |
|---|--|
| Espèce | <i>Arthrospira platensis</i> |
| Provenance | Villeneuve d'Ascq, France |
| Méthode de culture | Etangs ouverts |
| Process/traitement avant congélation | Récolte, filtration, rinçage à l'eau osmosée, filtration, pressage, refroidissement, conditionnement en sachets sous vides |
| Conditionnement | Sachets hermétiques de 70g |
| Méthode de congélation | Congélation lente (\pm 3h) jusqu'à -18°C |
| Méthode de conservation | Congélateur (-18°C) |

Lorsque la spiruline était utilisée dans le cadre d'une expérimentation, le sac hermétique était préalablement placé dans un bain à température ambiante jusqu'à décongélation complète du produit.

2 Formulations

2.1 Ingrédients

Tous les ingrédients et le matériel utilisés pour la préparation des burgers sont listés dans les **Tableaux 2 et 3**.

Tableau 2 : liste et provenance des ingrédients utilisés pour la fabrication des burgers

| Produit | Marque |
|---|---|
| Spiruline | « Etika Spirulina » |
| Farine de blé | « Everyday », Colruyt |
| Flocons d'avoine | « Everyday », Colruyt |
| Protéines Végétales Texturées | Beneo Pro W-TexWF 65-5001 65-7001 |
| Huile de tournesol | « Boni », Colruyt |
| Levure noble | Natu Food |
| Epices : poudre d'oignon, ail en poudre, poivre noir, origan, paprika fumé | « Boni », Colruyt |

Les ingrédients ont été sélectionnés en fonction de ce qu'il peut être retrouvé dans les burgers végétaux disponibles en supermarché.

La farine de blé et les flocons d'avoine, servent d'agents liants. Ils jouent un rôle crucial dans la cohésion du burger et absorbent l'humidité, ce qui influence la texture finale du produit.

L'huile de tournesol est utilisée pour l'apport en matière grasse dans le produit.

Les protéines végétales texturées sont utilisées comme agent texturant. Cet ingrédient est couramment employé dans les formulations de burgers végétaux pour leur donner une consistance semblable à celle de la viande.

La levure noble est utilisée ici comme épice, au même titre que la poudre d'oignon, l'ail en poudre, le poivre noir, l'origan et le paprika fumé.

Tableau 3 : liste du matériel utilisé pour la fabrication des burgers

| Matériel | Caractéristiques |
|----------------------|-------------------------|
| Robot de cuisine | Thermomix |
| Presse à burger | / |
| Papier cuisson | / |
| Bols mélangeurs | / |
| Robot pâtissier | Kitchenaid |
| Emporte pièce | 9 cm de diamètre |
| Balance de précision | Ohaus Navigator NV3202 |

2.2 Recettes

Toutes les recettes utilisées dans le cadre des expérimentations se retrouvent dans le **Tableau 4**. Bien que la base de la recette reste constante, les proportions des ingrédients varient selon les expérimentations réalisées.

Tableau 4 : proportions des ingrédients en fonction de la biomasse utilisée et des conditions d'expérimentation

| | Recette biomasse fraîche | Recette biomasse sèche | Recette sans PVT Ohmique | Recette avec PVT Ohmique | Recette sel 1 Ohmique | Recette sel 2 Ohmique | Recette sel 3 Ohmique |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Biomasse fraîche (g) | 60 | 0 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Biomasse sèche (g) | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PVT (5 mm) (g) | 20 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| PVT (7 mm) (g) | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 |
| Farine de blé (g) | 6,5 | 6,5 | 16,5 | 6,5 | 17,5 | 17 | 16,4 |
| Huile de tournesol (g) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Eau (g) | 0 | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flocons d'avoine (g) | 6,5 | 6,5 | 16,5 | 6,5 | 17,5 | 17 | 16,4 |
| Sel (g) | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0 | 1 | 2,2 |
| Epices (g) | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 0 | 0 | 0 |
| Masse totale (g) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Total Lip (% w/w) | 6,77 | 6,77 | 7,36 | 6,77 | 7,44 | 7,40 | 7,35 |
| Total Prot (%w/w) | 24,76 | 24,72 | 14,16 | 24,72 | 14,40 | 14,28 | 14,14 |
| Total Eau (%w/w) | 49,17 | 49,32 | 49,67 | 49,32 | 49,88 | 49,77 | 49,64 |
| Total MS (%w/w) | 50,84 | 50,69 | 50,34 | 50,69 | 50,12 | 50,23 | 50,36 |

Expérience 1 : recherche de la meilleure formulation de burger

Expérience 2 : impact de la présence des PVT dans la formulation et la cuisson ohmique des burgers

Expérience 3 : impact de la concentration en sel sur la cuisson ohmique des burgers

2.3 Préparation des burgers

2.3.1 Préparation de la pâte

Pour la première expérimentation, cinq conditions ont été testées et donc cinq manières de préparer la pâte ont été réalisées. Dans tous les cas la préparation de la pâte s'établit comme suit :

- Moudre les flocons d'avoine 2 secondes au Thermomix à pleine puissance.
- Préparer le mélange d'épices contenant : poivre, levure noble, poudre d'oignon, ail en poudre, origan et paprika fumé et y rajouter le sel.
- Dans un bol, mélanger tous les ingrédients secs soit : PVT, mélange d'épices, flocons d'avoine moulus et farine de blé.
- En fonction des conditions, rajouter les ingrédients liquides ainsi que la biomasse.
- Mélanger le tout au KitchenAid à l'aide de l'embout « batteur plat » à vitesse 1 durant 1 minute.
- Laisser poser le mélange en fonction de la condition.

Tableau 5 : conditions de l'expérimentation 1

| | Condition 1 | Condition 2 | Condition 3 | Condition 4 | Condition 5 |
|----------------------------------|---|---------------|--|--|---|
| Biomasse utilisée | Fraiche | Fraiche | Fraiche | Sèche | Sèche |
| Spécificité | La biomasse fraiche est ajoutée au mélange en même temps que les autres ingrédients | = condition 1 | La biomasse fraiche est chauffée sous vide 1h à 80°C avant incorporation à la pâte | La poudre est réhydratée avant incorporation à la pate | La poudre est ajoutée au mélange en même temps que les autres ingrédients |
| Temps de repos de la pâte | 1 heure | 1 nuit | 1 heure | 1 nuit | 1 heure |

2.3.2 Préparation du burger

- Peser environ 125g de mélange.
- Faire une boule et l'aplatir légèrement.
- Afin de minimiser les pertes de matière, déposer une feuille de papier cuisson dans la presse à burger et y déposer le burger.
- Recouvrir de papier cuisson et presser de sorte à façonner le burger.
- Récupérer le burger et lui donner sa forme finale à l'aide d'un emporte-pièce de 9 cm de diamètre.



Figure 3 : burgers de spiruline avant cuisson

2.4 Mesures et traitements réalisées sur la biomasse et les produits

2.4.1 Colorimétrie

La colorimétrie est utilisée dans le but d'analyser et comparer la couleur des échantillons et est effectuée à l'aide d'un colorimètre « ColorFlex EZ – HunterLab ». La cellule de mesure contenait un mélange homogène de biomasse lorsqu'elle était à l'état de pâte et le centre du steak lorsqu'elle était à l'état de burger. Les données colorimétriques ont été récoltées dans l'espace CIE $L^*a^*b^*$ où L^* correspond à la clarté/luminosité, a^* au rougissement/verdissement et b^* au jaunissement/bleuissement. Les pertes de couleurs totales sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta Lab = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

2.4.2 Homogénéisation de la biomasse

Dans un cas particulier, la biomasse fraîche a été prétraitée à l'aide d'un disperseur/homogénéisateur « ULTRA-TURRAX » pendant 3 minutes à 10 000 rpm.

2.4.3 Dénaturation des protéines

La température de dénaturation des protéines de la biomasse fraîche a été observée au moyen de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC TA Q1000). Pour ce faire, environ 6 milligrammes de biomasse ont été pesés dans un creuset, puis placés dans l'appareil. La mesure a été réalisée selon un protocole interne : équilibrage de la température à 20°C puis augmentation de 5°C par minute jusqu'à atteindre 120°C. Les résultats ont été traités grâce au programme « TA Universal Analysis ».

2.4.4 Matière sèche

La matière sèche a été effectuée selon le protocole interne suivant : une quantité de ± 5 grammes de produit ($M_{éch}$) était déposée dans un berlin préalablement pesé et taré (M_{berlin}) puis placée dans une étuve « Memmert UF110 » pour une durée de 3h à 130°C. Une fois le temps de séchage écoulé, les berlins étaient pesés après refroidissement dans un dessiccateur (M_{tot}). Le pourcentage de matière sèche est déterminé grâce à la formule suivante :

$$\% MS = \left(\frac{(M_{tot} - M_{berlin})}{M_{éch}} \right) \times 100$$

2.4.5 Pertes de cuisson

Les pertes de cuisson correspondent à la différence de masse du produit suite au processus de cuisson. Elles ont été calculées en pesant chaque burger avant et directement après cuisson en utilisant la formule suivante :

$$\% \text{ pertes de cuisson} = \left(\frac{M_{cru} - M_{cuit}}{M_{cru}} \right)$$

Les pesées ont été réalisées à l'aide d'une balance de précision « Ohaus Navigator NV3202 ».

2.4.6 Pertes en eau

Les pertes en eau correspondent à la différence d'humidité du produit suite au processus de cuisson. Elles sont calculées en faisant la matière sèche des burgers avant cuisson et après cuisson et sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$$\% \text{ pertes en eau} = (\% \text{ humidité}_{cru} - \% \text{ humidité}_{cuit})$$

2.4.7 Géométrie du burger

La hauteur et le diamètre des burgers avant et après cuisson ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse. Le burger étant assimilé à un cylindre, son volume a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Volume estimé} = \pi * \left(\frac{\text{diamètre}}{2} \right)^2 * \text{hauteur}$$

2.4.8 Rhéomètre

Les analyses de rhéologie ont été réalisées à l'aide d'un rhéomètre « Anton Paar - MCR 302 ». Pour ce faire, l'échantillon à analyser était étalé uniformément sur le socle de l'appareil et l'analyse a été réalisée à l'aide d'une sonde de type cône plan (CP50-1). Les mesures commencent à vitesse faible et cette dernière augmente progressivement jusqu'à atteindre 150 rotations par minute. Cette augmentation de vitesse permet d'observer le comportement du produit lorsqu'il est soumis à une contrainte de cisaillement croissante. La vitesse de rotation est ensuite réduite de manière similaire et permet d'observer la réponse du produit à une contrainte de cisaillement décroissante.

2.4.9 Texturomètre

Les analyses de textures ont été réalisées à l'aide d'un texturomètre « TA1 Lloyd Instruments ». Pour cela, un échantillon cylindrique était découpé dans le burger à l'aide d'un emporte-pièce de 2,4 cm de diamètre.

Les paramètres du texturomètre sont les suivants : compression à 40% de la hauteur initiale, sonde de 5 cm de diamètre, vitesse de 2,5 mm/s, cellule de charge de 500 N. Le programme « Nexygen Plus 4.1 » est rattaché à l'appareil et calcule divers paramètres permettant d'analyser le profil de texture. Parmi tous les paramètres obtenus, « cohesiveness », « resilience », « springiness », « hardness » et « chewiness » seront retenus pour les analyses.

2.5 Cuisson des préparations à base de biomasse

2.5.1 Four conventionnel

Les burgers ont été cuits au moyen d'un four conventionnel « Rational SelfCooking Center ». La cuisson s'est effectuée sur une grille recouverte de papier cuisson, à une température de 180°C et durant 12 minutes. Afin de permettre une cuisson homogène, les burgers étaient retournés après 6 minutes.

2.5.2 Poêle

La cuisson à la poêle a été effectuée à l'aide d'une poêle en téflon sur une plaque à induction. Le burger était déposé dans la poêle, sans matière grasse et à travers une feuille de papier cuisson, lorsque celle-ci avait atteint la température de $\pm 150^{\circ}\text{C}$. Le temps de cuisson moyen est de 3 minutes 20 secondes, temps nécessaire à la formation d'une croûte à la surface du burger.

2.5.3 Four ohmique

Le four ohmique utilisé pour les cuissons provient de la firme « Emmepiemme ». Il est équipé d'une alimentation standard de 230V/50Hz (**Figure 4**). Deux tensions ont été choisies afin d'effectuer les cuissons, soit : 50V et 150V. Le temps de cuisson était déterminé en fonction de la conductivité du produit, qui devait atteindre 0 mS/cm. La cellule de cuisson, un cylindre en polycarbonate d'une hauteur de 7cm et de diamètre de 5,35cm, était connectée au courant via deux électrodes placées à ses extrémités (**Figure 5**). La pâte à burger, pesant entre 70 et 85g, remplissait la cellule de manière à entrer en contact avec les deux électrodes.

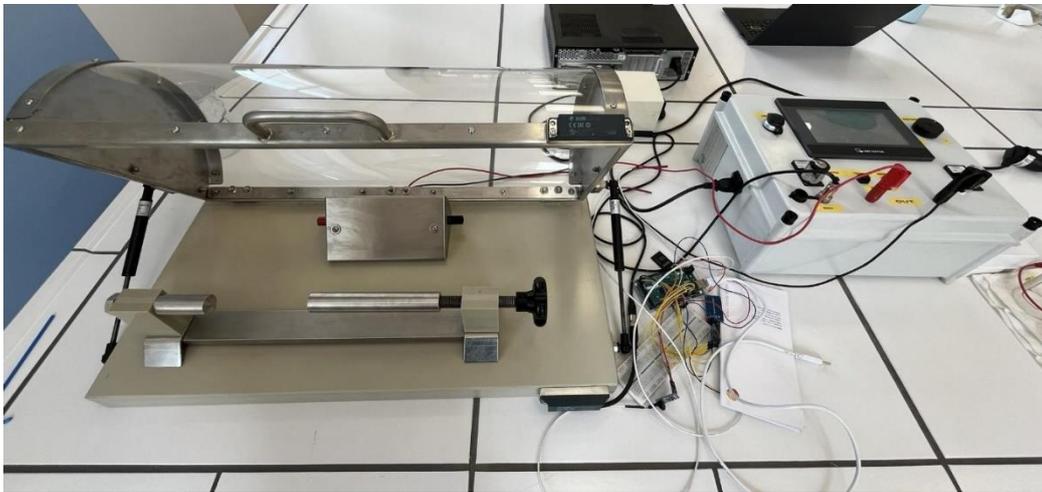


Figure 4 : configuration du four ohmique

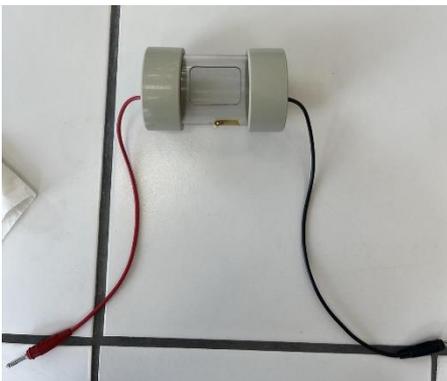


Figure 5 : électrodes et cellule de cuisson

2.5.4 Cuisson bain thermostaté

Les burgers étaient préalablement mis sous vide 2 secondes à l'aide de l'appareil « Original Henkelman Jumbo 42 vacuum sealer » afin de ne pas écraser et altérer la forme de ces derniers. Ils étaient ensuite placés dans un bain thermostaté « Anova Precision Cooker » à une température de 60°C. Pour le chauffage de la biomasse pure, les sachets hermétiques contenant celle-ci étaient directement placés dans le bain thermostaté à la température souhaitée soit : 35°C, 60°C ou 80°C. Dans tous les cas, le temps de cuisson était d'une heure.

3 Analyse statistique

Les analyses statistiques et les graphiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R-Studio, avec la collaboration d'un doctorant du Smart Gastronomy Lab. Lorsque plusieurs mesures par burger étaient effectuées et que plusieurs burgers étaient préparés indépendamment pour chaque condition, les mesures n'ont pas été considérées comme indépendantes. Un modèle mixte (avec effet fixe et effet aléatoire) a donc été utilisé. L'effet fixe étant la formulation, tandis que l'effet aléatoire concernait le burger en lui-même (la préparation et la cuisson).

Lorsque qu'une seule mesure était disponible par burger, une ANOVA a été réalisée à condition que les critères d'application de cette méthode soient respectés. Pour les comparaisons post-hoc, les tests HSD de Tukey ou de Games-Howell ont été employés en fonction des conditions. Si les critères n'étaient pas remplis, un test non paramétrique a été utilisé, à condition que le nombre de mesures soit suffisant.

Dans chaque tableau ou graphique, les différences significatives sont indiquées par des lettres. Pour chaque paramètre évalué, une lettre différente indique une différence statistiquement significative.

RESULTATS ET DISCUSSION

1 Caractérisation de la biomasse utilisée dans le cadre du travail

1.1 Détermination de la température de transition thermique des protéines présentes dans la biomasse étudiée (calorimétrie différentielle à balayage)

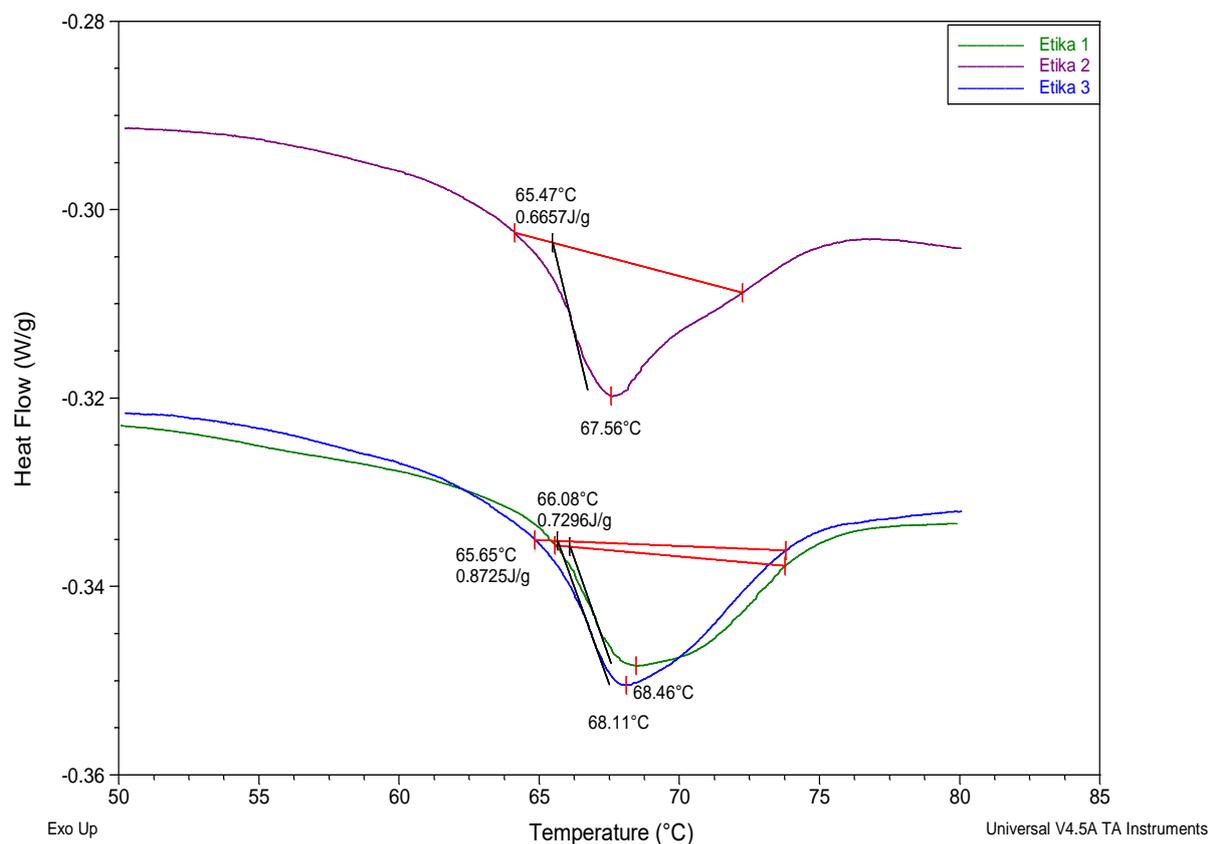


Figure 6 : courbes de transition thermique de la biomasse fraîche

La calorimétrie différentielle à balayage est une analyse se rapportant aux échanges thermiques entre l'échantillon et le milieu extérieur. Elle est couramment utilisée afin de déterminer la température de transition thermique de molécules telles que les protéines (42). Les courbes de la **Figure 6** montrent des transitions endothermiques (pics dirigés vers le bas), indiquant que la chaleur est absorbée par les échantillons lors de la montée en température. Il y a trois courbes DSC pour trois répétitions d'un échantillon de biomasse « Etika Spirulina ». Chaque courbe présente une transition thermique. Le début de la transition est observé sur une plage de température située entre 65,47°C et 66,08°C. C'est à ces températures que le processus de dénaturation commence atteignant son maximum aux pics des graphiques, donc entre 67,56°C et 68,46°C. C'est à ce moment que la moitié des protéines sont dénaturées (43).

Les trois courbes montrent une bonne cohérence avec des différences mineures. Les légères variations dans les températures pourraient être le résultat de différences subtiles dans la préparation ou dans la structure des échantillons, notamment une teneur en eau légèrement différente. Une étude a démontré une transition thermique sur *Spirulina platensis* aux environs de 67°C ce qui correspond à ce qui a été obtenu dans le cadre de ce travail (5).

1.2 Etude du comportement de la biomasse en fonction de la température

1.2.1 Analyse colorimétrique

Tableau 6 : paramètres de couleur de la poudre de spiruline et de la spiruline fraîche en fonction de la température et du prétraitement. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

| | L* | a* | b* |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Biomasse fraîche | 7,87 ± 0,06 ^a | -1,74 ± 0,08 ^a | 4,81 ± 0,05 ^a |
| Biomasse ULTRA-TURRAX | 3,37 ± 0,19 ^b | 0,45 ± 0,15 ^b | 1,68 ± 0,06 ^b |
| Biomasse 35°C | 9,69 ± 0,31 ^b | -0,84 ± 1,25 ^{bcd} | 6,75 ± 0,07 ^c |
| Biomasse 60°C | 8,54 ± 0,10 ^b | -3,70 ± 0,11 ^c | 8,09 ± 0,12 ^d |
| Biomasse 80°C | 7,52 ± 0,10 ^e | -0,96 ± 0,14 ^e | 7,86 ± 0,16 ^e |
| Poudre | 2,84 ± 0,04 ^f | 2,00 ± 0,07 ^d | 1,53 ± 0,07 ^f |

L* représente la mesure de la luminosité où 0 = noir et 100 = blanc, a* est la composante qui va du vert (-) au rouge (+) et b* est la composante qui va du bleu (-) au jaune (+).

Les valeurs de luminosité les plus élevées sont associées à la biomasse fraîche et à la biomasse chauffée à 80°C (**Tableau 6**). Les valeurs de luminosité les plus faibles sont, quant à elles, associées à la biomasse prétraitée à l'ULTRA-TURRAX et à la poudre. En ce qui concerne l'ULTRA-TURRAX, cela pourrait dû à la lyse des cellules qui diminue la réflexion de la lumière. Pour la poudre, cela peut être dû au procédé de séchage qui concentre les pigments et rend la spiruline plus foncée. Une valeur négative de a* aurait été attendue puisque la poudre est connue pour sa couleur verte, dû aux chlorophylles qui sont dominantes (44). Cette même concentration des pigments influencent également la valeur de b* qui tire plus vers le bleu que n'importe quelle autre condition. En effet, parmi les pigments les plus importants, on retrouve la phycocyanine, qui est responsable de la couleur bleue intense qui ressort lorsque la poudre est réhydratée (45). Plus la biomasse a été chauffée à haute température, plus celle-ci s'assombrit. De 35°C à 60°C, la tendance à tirer vers le vert (a*) et vers le jaune (b*) augmente alors qu'après 60°C, elle rediminue. Cela peut être dû au changement de conformation suite au dépassement de la température de transition thermique des protéines.

1.2.2 Analyse rhéologique

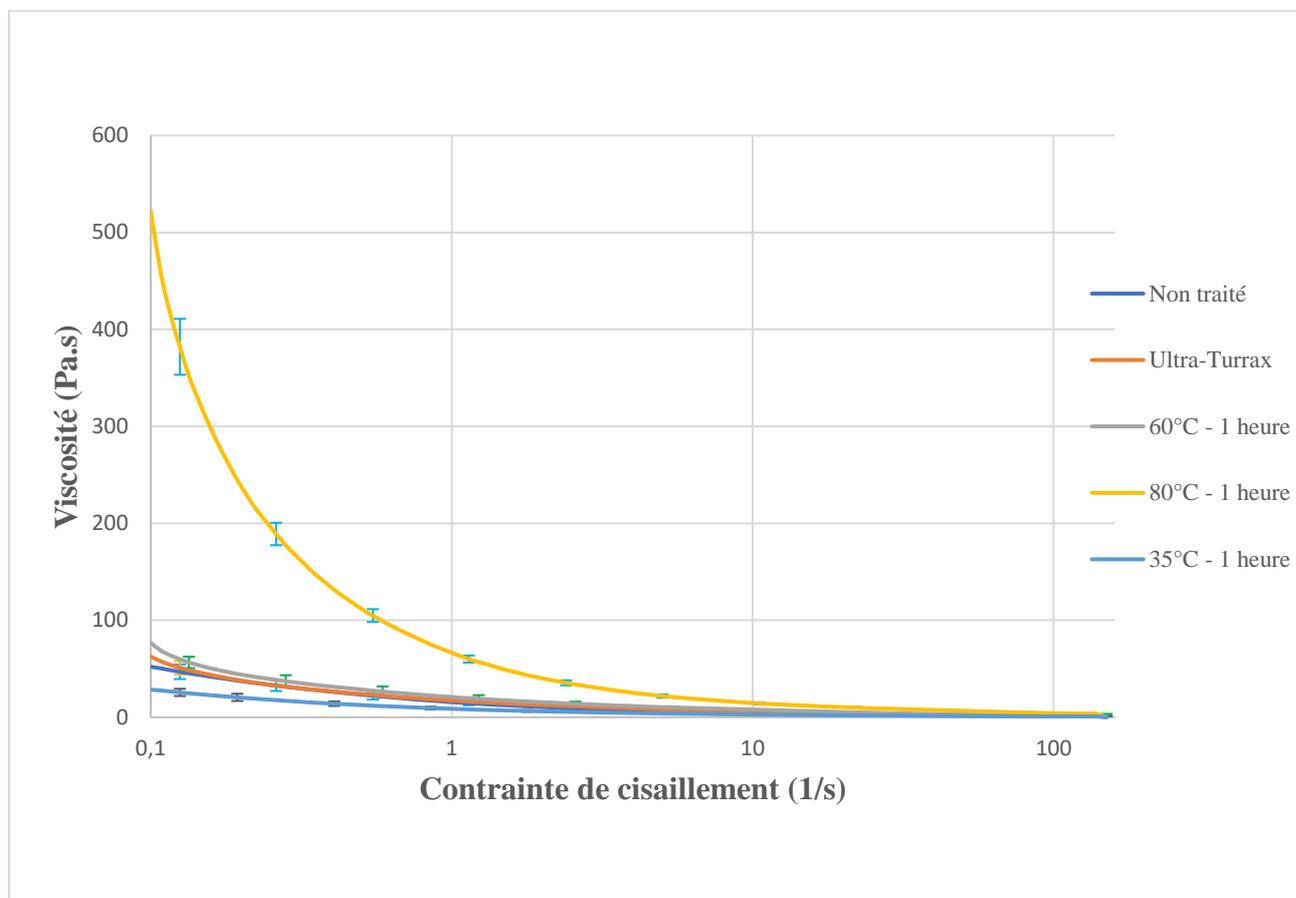


Figure 7 : diagramme de la viscosité en fonction de la contrainte de cisaillement pour la biomasse fraîche, prétraitée à l'ULTRA-TURRAX, et chauffée 1 heure à différentes températures. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

La spiruline, comme attendu, peut être considérée comme un fluide non Newtonien rhéofluidifiant au vu des résultats obtenus (**Figure 7**). En effet, la plupart des fluides rhéofluidifiants, voient leur viscosité décroître avec la contrainte de cisaillement, en raison de modification de leur structure interne (46). L'évaluation du comportement rhéologique des liquides alimentaires est essentielle afin d'optimiser la conception d'un produit, ainsi que pour assurer le contrôle de la qualité et l'acceptabilité par les consommateurs (47).

La courbe de la biomasse chauffée une heure à 80°C se démarque par sa viscosité élevée. Ce résultat est probablement dû au dépassement de la température de dénaturation des protéines, entraînant un changement dans la structure interne du produit (processus de gélification). La dénaturation des protéines correspond à un changement de conformation de celles-ci et a donc pour effet d'augmenter la viscosité d'un produit (48).

Il est plus surprenant de constater que la spiruline prétraitée à l'ULTRA-TURRAX présente une viscosité plus élevée que la spiruline fraîche alors que l'inverse aurait été attendu.

En effet, l'ULTRA-TURRAX est un disperseur à haute vitesse, ce qui signifie qu'il provoque la rupture des cellules ce qui a pour effet de diminuer la viscosité du produit. Cela pourrait être dû au fait que le traitement n'ait pas été appliqué assez longtemps pour avoir un réel impact sur la structure interne.

La courbe de la spiruline à 35°C montre la viscosité la plus faible, bien que les différences avec la spiruline fraîche soient peu significatives. On observe ainsi une tendance à l'augmentation de la viscosité avec la température.

2 Etude de différentes formulations de pâte à burger en fonction de différentes conditions

2.1 Comparaison des burgers avant cuisson

Tableau 7 : valeurs de la masse, de la géométrie et de l'humidité des burgers avant cuisson en fonction des conditions de préparations. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

| | Masse (g) | Diamètre (cm) | Hauteur (cm) | Volume (cm³) | Humidité (%) |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| C1 | 86,52 ± 1,41 ^a | 8,97 ± 0,06 ^b | 1,87 ± 0,06 ^a | 117,86 ± 3,19 ^a | 47,88 ± 0,31 ^a |
| C2 | 84,92 ± 2,10 ^a | 8,80 ± 0,00 ^a | 1,90 ± 0,10 ^a | 115,56 ± 6,08 ^{ab} | 48,07 ± 0,47 ^a |
| C3 | 84,19 ± 4,04 ^a | 8,73 ± 0,06 ^a | 1,63 ± 0,06 ^b | 97,88 ± 4,78 ^b | 48,11 ± 0,71 ^a |
| C4 | 83,03 ± 2,36 ^a | 8,77 ± 0,06 ^a | 1,70 ± 0,10 ^{ab} | 102,62 ± 6,23 ^{bc} | 48,20 ± 0,48 ^a |
| C5 | 85,75 ± 0,92 ^a | 8,83 ± 0,06 ^{ab} | 1,73 ± 0,06 ^{ab} | 106,21 ± 3,07 ^b | 48,08 ± 0,45 ^a |

Rappel des conditions : C1, C2 et C3 sont les conditions dans lesquelles la spiruline fraîche était utilisée. Pour C1, le temps d'hydratation de la pâte était d'une heure alors que pour C2, il était d'une nuit au frigo. Pour C3, la spiruline a été chauffée une heure à 80°C avant incorporation à la pâte. C4 et C5 sont les conditions dans lesquelles la poudre de spiruline a été utilisée. Pour C4, la poudre a été réhydratée 24 heures avant incorporation à la pâte alors que pour C5, la poudre a été ajoutée directement dans le mélange.

En termes de masse avant cuisson, les burgers montrent des résultats statistiquement similaires, peu importe la méthode de préparation (**Tableau 7**). Cela démontre une certaine standardisation dans la manière de procéder.

En ce qui concerne la géométrie des burgers, le volume, dépendant du diamètre et de la hauteur, montrent certaines différences entre les méthodes de préparation. A première vue, la grande différence entre C1 et C3 pourrait être liée au préchauffage à 80°C qui impacte la structure de la spiruline et donc du burger.

Cependant, il est important de noter que la prise de mesures, effectuée manuellement à l'aide d'un pied à coulisse, peut introduire un biais dû à des erreurs de manipulation, ce qui doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

Les valeurs d'humidité ne présentent pas de différence dépendant de la méthode de préparation. Les temps d'hydratation et l'utilisation de poudre à la place de biomasse fraîche n'ont donc aucune influence sur l'humidité totale du produit.

Tableau 8 : Valeurs des paramètres de couleur des burgers de spiruline avant cuisson en fonction des conditions de préparation. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

| | L* | a* | b* |
|-----------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| C1 | 14,62 ± 0,12 ^a | -8,75 ± 0,10 ^a | 5,51 ± 0,13 ^a |
| C2 | 13,79 ± 0,12 ^b | -8,06 ± 0,11 ^b | 5,40 ± 0,05 ^a |
| C3 | 9,53 ± 0,17 ^c | -0,39 ± 0,11 ^c | 7,90 ± 0,33 ^d |
| C4 | 4,93 ± 0,34 ^d | -2,02 ± 0,38 ^d | 2,40 ± 0,14 ^b |
| C5 | 5,30 ± 0,70 ^d | -2,03 ± 0,20 ^d | 1,72 ± 0,46 ^c |

Les burgers de spiruline fraîche non chauffés (C1 et C2) ont des couleurs relativement similaires si l'on compare aux autres conditions (**Tableau 8**). Elles ont toutes deux une teinte vert-jaune plus prononcée, C1 étant particulièrement plus lumineuse. La spiruline fraîche préchauffée (C3) se distingue par une luminosité plus faible, une réduction significative du vert (a*) et une augmentation du jaune (b*). Cela indique que le préchauffage à haute température a significativement altéré la couleur du burger, ce résultat était attendu au vu des résultats obtenus précédemment sur la biomasse pure. Les burgers de spiruline en poudre (C4 et C5) présentent les couleurs les plus sombres avec une teinte moins verte et moins jaune que les autres conditions. La poudre étant initialement plus foncée que la spiruline fraîche, ce résultat était également attendu.

2.2 Impact de la cuisson

2.2.1 Paramètres physiques

Tableau 9 : différences de géométrie et pertes en eau entre les burgers avant et après cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

| | Δ Diamètre (cm) | Δ Hauteur (cm) | Δ Volume (cm ³) | Pertes en eau (%) |
|-----------|------------------------------|-----------------------------|--|--------------------------|
| C1 | 0,07 ± 0,06 ^a | -0,10 ± 0,17 ^a | -4,36 ± 9,29 ^a | 5,63 ± 0,78 ^a |
| C2 | -0,03 ± 0,15 ^a | -0,10 ± 0,10 ^a | -7,03 ± 6,19 ^a | 4,75 ± 0,57 ^a |
| C3 | -0,10 ± 0,00 ^a | -0,10 ± 0,00 ^a | -8,38 ± 0,18 ^a | 5,22 ± 0,51 ^a |
| C4 | -0,17 ± 0,15 ^a | -0,10 ± 0,00 ^a | -10,12 ± 3,74 ^a | 5,99 ± 0,23 ^a |
| C5 | 0,03 ± 0,06 ^a | -0,13 ± 0,06 ^a | -7,32 ± 4,36 ^a | 5,37 ± 0,60 ^a |

Les résultats présentés dans le **Tableau 9** suggèrent que la cuisson entraîne une réduction du diamètre, de la hauteur et donc du volume des burgers, ce qui est cohérent avec la perte d'eau observée. La réduction du volume après cuisson est un phénomène bien connu, que ce soit pour les burgers de viande ou végétaux. Cela est principalement dû à la perte d'eau et de graisse qui se produit lorsque le produit est exposé à la chaleur. A titre de comparaison, pour les burgers de viande, la réduction du diamètre peut atteindre entre 11 et 20%, en fonction de la température de cuisson (49). Les différences sont plus faibles dans le cas du burger de spiruline étant donné la faible teneur en matière grasse et la faible teneur en eau.

En ce qui concerne les pertes en eau, celles des burgers de spiruline sont nettement inférieures aux valeurs associées au burgers de viande qui peuvent atteindre jusqu'à 24%. Cependant, burgers végétaux montrent également des pertes en eau plus faibles après cuisson comparé aux burgers de bœuf, variant entre 7 et 11% (50,51).

Les grands écarts types associés à la variation de volume peuvent être expliqués par la manière de préparer les burgers, qui n'est pas totalement homogène, mais aussi à la variabilité dans la prise de mesure du diamètre et de la hauteur à l'aide du pied à coulisse.

Tableau 10 : différence des paramètres de couleur et changement total de la couleur entre les burgers avant et après cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

| | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | Δ Total couleur |
|-----------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| C1 | $3,87 \pm 0,70^a$ | $6,99 \pm 0,31^a$ | $-3,39 \pm 0,40^a$ | $8,70 \pm 0,11^a$ |
| C2 | $3,33 \pm 0,44^a$ | $7,83 \pm 0,15^a$ | $-3,88 \pm 0,13^a$ | $9,36 \pm 0,23^{ab}$ |
| C3 | $7,98 \pm 0,60^b$ | $0,74 \pm 0,07^b$ | $-5,31 \pm 0,55^b$ | $9,64 \pm 0,31^b$ |
| C4 | $10,63 \pm 0,40^c$ | $0,94 \pm 0,63^b$ | $-1,70 \pm 0,17^c$ | $10,81 \pm 0,40^c$ |
| C5 | $12,40 \pm 0,30^d$ | $0,56 \pm 0,09^b$ | $-0,74 \pm 0,24^d$ | $12,43 \pm 0,30^d$ |

Les résultats du **Tableau 10** montrent que la cuisson affecte différemment les paramètres de couleur des burgers selon les conditions. C5 présente des modifications majeures dans l'apparence globale du burger, tandis que C1 montre les changements les plus modestes.

2.2.2 Paramètres texturaux

Le TPA (Texture Profile Analysis), est un test de double compression, conçu pour simuler les deux premières bouchées d'un produit (52,53). Les différents paramètres sont regroupés en fonction des unités de mesure. Les valeurs de « cohésion », « résilience » et « élasticité » sont adimensionnelles et sont mesurées sur une échelle de 0 à 1. La « dureté 1 », « dureté 2 » et la « masticabilité » sont mesurées en Newton (**Figure 8**).

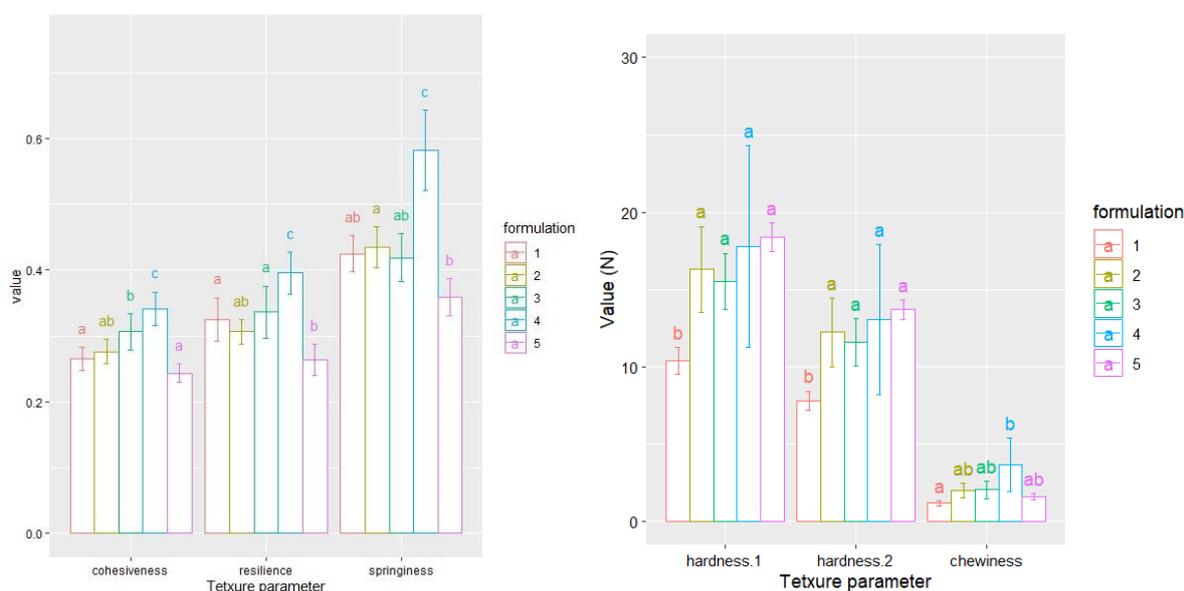


Figure 8 : paramètres de texture des burgers après cuisson en fonction des conditions de préparations. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

La cohésion mesure à quel point la structure du produit reste intacte lors de la mastication (54). La C4 (poudre réhydratée une nuit) montre une cohésion significativement plus élevée que les autres formulations. En revanche, la C5 (poudre ajouté directement à la pâte), suggère une texture plus friable de par ses valeurs plus faibles. La résilience de la C4 est également la plus élevée, indiquant qu'elle a la meilleure capacité à récupérer sa forme originale après déformation. La C5 a la résilience la plus faible, ce qui pourrait indiquer une texture plus molle et moins élastique. L'élasticité soutient cette observation, affichant la valeur la plus faible. A l'opposé, C4 montre la valeur d'élasticité la plus élevée, ce qui suggère que ce burger est bien plus élastique que les autres formulations. Finalement, C4 se distingue comme ayant la meilleure performance globale en terme de texture de par sa cohésivité, résilience et élasticité supérieures. A l'inverse, la C5 semble avoir les caractéristiques de texture les moins favorables de par ses valeurs plus faibles. Ce résultat est troublant car ces deux formulations utilisent la poudre de spiruline, à l'exception du fait que pour C5 la poudre n'a pas été réhydratée au préalable. Cela suggère que la réhydratation de la poudre pourrait être nécessaire pour obtenir de meilleures propriétés, bien que cette étape soit contraignante, tant pour une utilisation spatiale que dans un contexte domestique.

La dureté représente la force la force nécessaire pour compresser le burger à un certain pourcentage de sa hauteur (ici 40%) (53). Elle est mesurée à deux moments distincts (dureté 1 et dureté 2), chacune respectivement associées à la première compression et à la deuxième compression. Les résultats montrent que C1 présente une dureté inférieure lors des deux phases de compression par rapport aux autres formulations, suggérant une texture plus tendre. La masticabilité, qui représente l'énergie nécessaire pour mastiquer le produit jusqu'à ce qu'il soit prêt à être avalé, est plus élevé pour C4 que pour C1, ce qui indique que C4 nécessiterait un effort de mastication plus important.

Il est important de noter que les résultats relatifs à la texture rendent l'interprétation et la comparaison avec la littérature difficile, car ils varient considérablement en fonction des paramètres du test, tels que la sonde utilisée ou le pourcentage de déformation du produit (53). Cependant, une expérience réalisée au préalable au sein du Smart Gastronomy Lab a révélé que certains produits du supermarché de type burgers de viande ou végétaux, présentent généralement des valeurs de masticabilité et dureté plus élevées que celles obtenues pour toutes les formulations.

2.3 Choix de la meilleure formulation

Au vu des résultats obtenus, la formulation privilégiée est celle utilisant de la biomasse fraîche avec un temps d'hydratation minimal (C1). Bien que certaines variations significatives aient été observées au niveau de la texture du produit final, elles ne justifient pas la préférence pour une méthode de traitement par rapport à une autre. La réhydratation de la biomasse sèche (C4) semble offrir un avantage structurel en termes de texture, mais la couleur peu attrayante, les odeurs et saveurs indésirables associées à cette forme de spiruline constituent un inconvénient majeur. De plus, l'étape de réhydratation, que ce soit sur Terre ou en milieu spatial, introduirait des contraintes supplémentaires. C'est pourquoi, il est judicieux de privilégier une formulation simple et rapide à manipuler pour les futures expérimentations.

3 Etude comparative des cuissons

3.1 Comparaison des burgers avant cuisson

Tableau 11 : Valeurs de la masse, de la géométrie et de l'humidité des burgers avant différents modes de cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

| | Masse (g) | Diamètre (cm) | Hauteur (cm) | Volume (cm³) | Humidité (%) |
|-------------------------|------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|
| Poêle | 87,32 ± 7,36 | 8,90 ± 0,14 | 1,75 ± 0,07 | 108,95 ± 7,86 | 45,60 ± 0,45 |
| Four | 82,25 ± 4,18 | 9,13 ± 0,06 | 1,63 ± 0,06 | 107,00 ± 3,30 | 45,60 ± 0,45 |
| Bain thermostaté | 89,07 ± 5,58 | 9,00 ± 0,10 | 1,73 ± 0,06 | 110,23 ± 1,94 | 45,60 ± 0,45 |
| Ohmique (50V) | 88,43 ± 2,31 | / | / | / | 48,93 ± 0,22 |
| Ohmique (150V) | 88,35 ± 0,52 | / | / | / | 48,93 ± 0,22 |

Avant la cuisson, tous les burgers présentent une masse moyenne comprise entre 80 et 90 g. Les écarts-types élevés traduisent une difficulté à standardiser la méthode au sein d'un même échantillon, tant pour la masse que pour le volume (**Tableau 11**). Il est important de souligner que visuellement et lors des manipulations, la pâte se distinguait nettement des autres fois où les burgers ont été réalisés. Cette variabilité pourrait donc être attribuée à la spiruline qui avait un aspect différent, plus liquide, rendant la pâte particulièrement collante. Une mesure de la matière sèche a été effectuée sur la biomasse pure pour vérifier la teneur en eau, qui correspondait au pourcentage habituel de 23%, ce qui complique l'explication des difficultés rencontrées lors de la manipulation de la biomasse ce jour-là.

L'humidité est identique pour les burgers cuits à la poêle, au four, et au bain thermostaté, car ils proviennent de la même préparation. Il en va de même pour les burgers cuits par méthode ohmique.

Les mesures de géométrie n'ont pas été réalisées pour les burgers cuits au four ohmique. En raison de leur forme irrégulière, il a été impossible de mesurer leur hauteur et diamètre, aussi bien avant qu'après cuisson (**Figure 9**).



Figure 9 : burger de spiruline en cuisson et burger obtenu après cuisson

3.2 Impact de la cuisson

3.2.1 Paramètres physiques

Tableau 12 : paramètres physiques des burgers de spiruline en fonction du mode de cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. Pour la poêle, le four et le bain thermostaté (n=3). Pour le four ohmique (n=2).

| | Δ Diamètre (cm) | Δ Hauteur (cm) | Δ Volume (cm ³) | Pertes en eau (%) | Pertes de cuisson (%) |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|--------------------------|
| Poêle | 0,00 ± 0,00 | -0,15 ± 0,07 | -9,40 ± 4,70 | 2,46 ± 0,18 ^a | 4,14 ± 0,09 ^a |
| Four | 0,17 ± 0,21 | -0,17 ± 0,06 | -5,87 ± 4,22 | 4,30 ± 0,16 ^b | 6,50 ± 0,21 ^b |
| Bain thermostaté | / | / | / | -1,18 ± 0,17 ^c | 1,02 ± 0,11 ^c |
| Ohmique 50V | / | / | / | 11,71 ± 4,21 | 9,21 ± 0,33 ^d |
| Ohmique 150V | / | / | / | 5,31 ± 2,86 | 8,46 ± 1,49 ^d |

La cuisson au bain thermostaté n'est pas recommandée pour ce produit, car le burger reste trop humide après cuisson, rendant sa manipulation difficile (**Tableau 12**). Cela s'explique par le fait que, étant emballé sous vide avant cuisson, le burger conserve plus d'eau. Dans ce cas-ci, les pertes négatives observées sont difficiles à interpréter et pourraient suggérer une erreur dans la prise de données. La cuisson sous vide est connue pour réduire les pertes de cuissons et d'eau tant que la température n'est pas excessive. Cependant, des pertes d'eau se produisent toujours, avec une tendance à augmenter avec la température et le temps de cuisson (55).

La différence majeure entre la cuisson sous vide est que l'eau n'est pas évaporée mais reste piégée au sein de l'emballage.

Il existe une variation notable des pertes de cuisson et d'eau entre les trois modes de cuisson conventionnels étudiés.

Concernant la cuisson ohmique, les écarts-types élevés et le nombre limité de répétitions rendent toute analyse statistique peu fiable. Les pertes en eau pourraient être plus importantes à 50V qu'à 150V à cause du temps de cuisson qui est nettement plus long à 50V. Les pertes de cuisson élevées observées pour le four ohmique s'expliquent en partie par le fait qu'une portion du burger reste collée aux électrodes et aux parois de la cellule, ce qui n'est pas pris en compte lors de la pesée finale, réduisant ainsi le rendement global.

Les mesures de volume n'ont pas été prises pour la cuisson ohmique au vu de la forme du burger (**Figure 10**). Elles n'ont pas été prises pour le bain thermostaté non plus, mais on peut supposer que les volumes sont proches des valeurs avant cuisson, étant donné les faibles pertes de cuissons.



Figure 10 : burger de spiruline cuit à la poêle (haut/gauche), sous vide (haut/droite), four ohmique (bas/gauche), four (bas/droite)

3.2.2 Paramètres texturaux

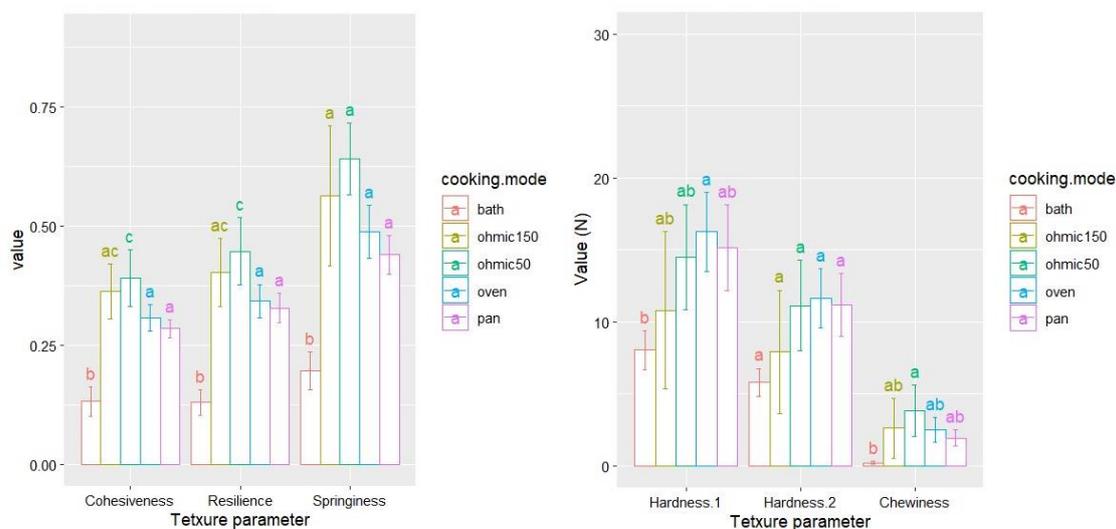


Figure 11 : paramètres de texture des burgers après différents modes de cuisson. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

Les paramètres de texture de la **Figure 11** nous indiquent les différences sur les produits finis en fonction des différents modes de cuisson. Notamment, la cuisson au bain thermostaté se révèle inférieure en termes de qualité texturale, probablement en raison des valeurs d'humidité plus élevées qui y sont associées, conduisant à une texture moins ferme et moins cohésive. A l'inverse, la cuisson ohmique à 50V semble améliorer la cohésion et la résilience du produit, surpassant légèrement, mais pas de manière significative, la cuisson à 150V. Cela est probablement dû à une durée de cuisson prolongée dans le four ohmique à basse tension.

Les méthodes de cuisson au four et à la poêle présentent des résultats similaires, suggérant que la formation d'une croûte plus prononcée lors de la cuisson à la poêle n'affecte pas significativement la texture du burger. Cependant, ces deux méthodes affichent des valeurs de dureté plus élevées, peut-être dû à l'assèchement accru des burgers et à la formation de croûtes, caractéristiques d'une cuisson non volumique. Cette formation de croûte pourrait conférer un avantage gustatif aux burgers car synonyme de réaction de Maillard et donc de développement de saveurs (56). En somme, la cuisson ohmique, particulièrement à 50V, pourrait offrir un avantage compétitif pour la production de burgers aux qualités texturales optimisées. La cuisson sous vide, bien qu'efficace dans pour la conservation de qualités organoleptiques (55), semble moins adaptée pour maintenir une texture ferme et cohésive, limitant ainsi son attrait pour ce type de produit.

4 Cuisson ohmique

4.1 Influence des PVT

Tableau 13 : paramètres des burgers avec et sans PVT cuits à différents intensités (50V/150V) au four ohmique. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

| | Tension (V) | Masse initiale (g) | Masse finale (g) | Pertes de cuisson (%) | Pertes en eau (%) | Conductivité initiale (mS/cm) | Conductivité max (mS/cm) | Temps cuisson (s) | Température finale (°C) |
|-----------------|-------------|--------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| PVT | 50 | 88,43 ± 2,31 | 80,28 ± 1,80 | 9,21 ± 0,33 ^a | 11,72 ± 4,21 | 0,80 ± 0,00 | 3,15 ± 0,07 | 2160,00 ± 42,43 | 93,95 ± 6,43 |
| Sans PVT | 50 | 87,76 ± 1,05 | 79,07 ± 1,79 | 9,91 ± 0,96 ^a | 9,2 ± 4,86 | 1,45 ± 0,07 | 3,65 ± 0,07 | 1366,50 ± 82,73 | 97,55 ± 1,34 |
| PVT | 150 | 88,35 ± 0,52 | 80,88 ± 0,84 | 8,46 ± 1,49 ^a | 5,31 ± 2,89 | 1,20 ± 0,00 | 3,15 ± 0,07 | 176,00 ± 48,08 | 98,40 ± 0,85 |
| Sans PVT | 150 | 90,66 ± 1,07 | 83,48 ± 0,67 | 7,92 ± 0,35 ^a | 6,68 ± 5,61 | 1,40 ± 0,00 | 3,40 ± 0,00 | 158,00 ± 8,49 | 99,45 ± 0,21 |

Le **Tableau 13** indique que les pertes de cuisson semblent légèrement plus élevées pour la cuisson à 50V que pour la cuisson à 150V mais que cette différence n'est statistiquement pas significative, indiquant que ces pertes ne sont pas influencées de manière notable par le voltage ou la présence de PVT. Le temps de cuisson est en revanche plus long à 50V, et l'absence de PVT semble accélérer ce processus de manière significative à cette tension. A 150V, la présence de PVT n'a pas d'effet notable sur le temps de cuisson. Il était attendu que la cuisson à 150V se démarque positivement par rapport à celle à 50V car la tension est connue pour avoir un effet sur le temps de cuisson (40).

Dans les deux cas, la conductivité maximale est légèrement plus élevée sans PVT, ce qui pourrait s'expliquer par la tendance des PVT à absorber l'eau (de par leur structure poreuse) et la rendre moins disponible et donc à réduire la conductivité (57).

La cuisson était arrêtée lorsque la conductivité électrique atteignait 0 mS/cm. Ce choix, bien que tout à fait arbitraire, se justifie par le fait que la conductivité électrique de l'aliment est directement liée à la présence d'ions mobiles provenant principalement de l'eau et de sels dissous. Partant du principe qu'une conductivité de 0 mS/cm correspond à la perte majoritaire des ions mobiles, cela peut signifier que la cuisson est probablement terminée car plus de liquide conducteur pour continuer à chauffer efficacement le produit.

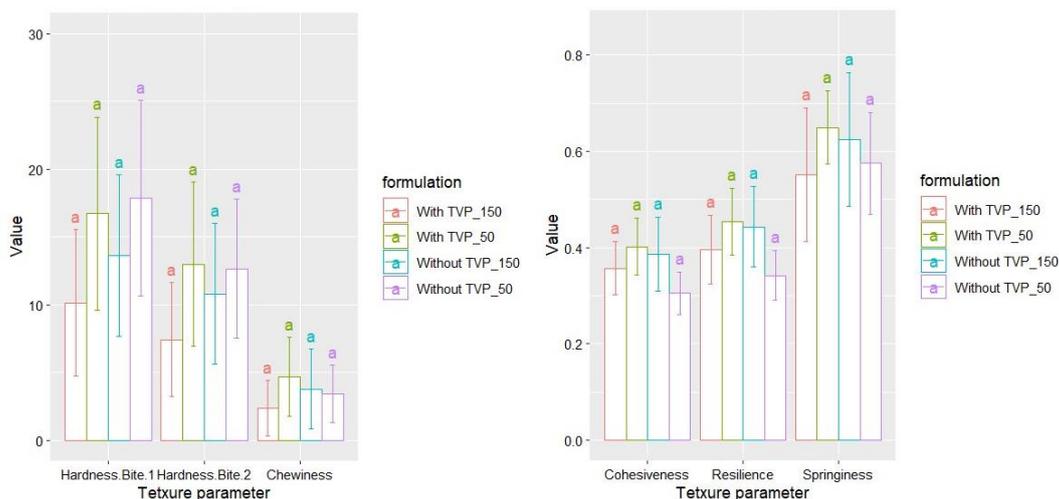


Figure 12 : paramètres texturaux des burgers en fonction de la teneur en PVT et de la tension appliquée. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

La principale observation de la **Figure 12** est la grande variabilité des mesures, mise en évidence par des écarts-types très élevés. Cette variabilité s'explique par la difficulté à prélever des échantillons de manière reproductible. En effet, le burger obtenu par cuisson ohmique n'a pas une forme cylindrique parfaite mais présente une forme irrégulière en raison des contraintes imposées par la cellule de cuisson. De plus, l'absence de croûte et une texture plus molle rendait difficile la standardisation du prélèvement de l'échantillon avec la sonde pour l'analyse au texturomètre. Il est également important de noter que, contre toute attente, l'absence de PVT ne semble pas avoir d'impact significatif sur la texture des burgers, alors que l'effet inverse était attendu, étant donné que cet ingrédient est spécifiquement conçu pour texturer des produits et leur donner un aspect similaire à la viande (58,59).

4.2 Influence de la concentration en sel

4.2.1 Paramètres physiques

Tableau 14 : paramètres des burgers dont la concentration en sel varie de manière linéaire. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=2).

| | Masse initiale (g) | Masse finale (g) | Pertes de cuisson (%) | Pertes en eau (%) | Conductivité initiale (mS/cm) | Conductivité max (mS/cm) | Temps de cuisson (s) | Température finale (°C) |
|-------------------|--------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Sel 1 0,3% | 89,03 ± 0,18 | 80,59 ± 2,84 | 9,48 ± 3,38 ^a | 7,16 ± 3,49 ^a | 0,85 ± 0,07 | 1,90 ± 0,14 | 225,00 ± 45,25 | 99,05 ± 0,49 |
| Sel 2 1,3% | 89,31 ± 0,16 | 78,98 ± 6,07 | 11,58 ± 6,65 ^a | 3,25 ± 1,58 ^a | 2,55 ± 0,21 | 4,90 ± 0,71 | 74,50 ± 6,36 | 97,95 ± 0,07 |
| Sel 3 2,5% | 89,53 ± 3,05 | 80,84 ± 6,56 | 9,77 ± 4,26 ^a | 2,55 ± 0,79 ^a | 4,40 ± 0,14 | 8,70 ± 0,85 | 62,00 ± 21,21 | 97,40 ± 0,57 |

Les différentes concentrations en sel sont définies comme suit : concentration initialement présente dans la spiruline (Sel 1 = 0,3g/100g de pâte), concentration intermédiaire (Sel 2 = 1,3g/100g de pâte) et concentration permettant d'atteindre la moitié de l'apport quotidien recommandé en sel pour un burger de 100g (Sel 3 = 2,5g/100g pâte), conformément à la dose maximale recommandée par l'OMS (60) (**Tableau 14**).

La conductivité initiale et maximale augmente avec la concentration en sel, ce qui est attendu, car le sel impacte positivement la conductivité électrique (35,40,61). Le temps de cuisson diminue avec l'augmentation du sel, probablement en raison de l'amélioration de l'efficacité de la cuisson ohmique.

Les pertes de cuisson, dans le cas de la cuisson ohmique, correspondent à la réduction de matière après l'extraction du burger de la cellule de cuisson. L'inadéquation de la cellule à la forme du burger, entraîne fréquemment des résidus sur les parois (**Figure 13**). Cela rend la mesure de masse et des pertes de cuissons peu homogène, comme en témoignent les écarts types importants observés.

Les pertes en eau semblent à première vue différentes, cependant les écart-types sont conséquents et aucune différence significative n'est observée.

Une légère diminution de la température observée pourrait être due à une prise de mesure non répétable effectuée manuellement avec un thermomètre alimentaire.



Figure 13 : cellule de cuisson du four ohmique contenant la pâte à burger

4.2.2 Paramètres texturaux

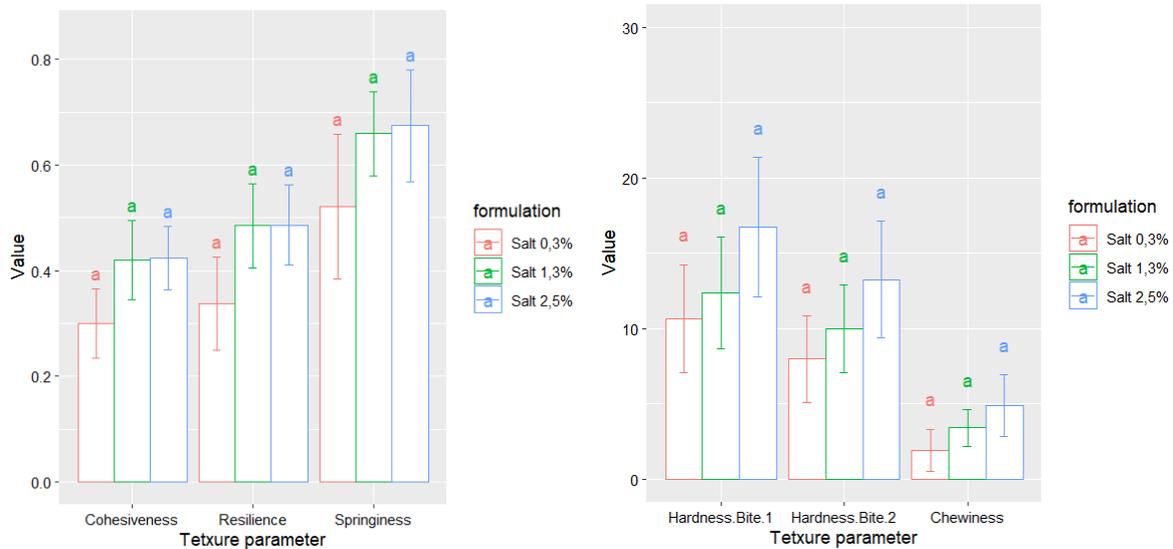


Figure 14 : paramètres de texture des burgers contenant différentes concentrations en sel et cuits au four ohmique. Les moyennes et écarts-types sont indiqués. (n=3).

Il est important de rappeler que les mesures de texture sur les burgers cuits par cuisson ohmique doivent être interprétées avec prudence en raison des difficultés rencontrées lors de la prise d'échantillons. Globalement, comme le montre la **Figure 14**, la concentration en sel n'affecte pas de manière significative la texture des burgers, bien que l'on observe une tendance à l'augmentation des paramètres, en particulier la dureté et la masticabilité. L'inverse aurait pu être attendu étant donné que les burgers les plus concentrés en sel passaient moins de temps dans le four.

CONTRIBUTION PERSONNELLE

- ❖ Participation active à la définition des objectifs du projet
- ❖ Développement des protocoles expérimentaux
- ❖ Réalisation des expériences en laboratoire, incluant la préparation des échantillons, la mise en œuvre des différentes techniques de cuisson et la collecte des données
- ❖ Traitement, analyse et rédaction des résultats avec des propositions de perspectives pour des recherches futures
- ❖ Développement de compétences techniques et renforcement des compétences en organisation de tâches expérimentales, planification et collaboration avec l'équipe du laboratoire

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de fin d'études décrit une série d'expérimentations visant à développer une recette de burger à base de biomasse fraîche de spiruline, avec un accent particulier mis sur l'optimisation des méthodes de fabrication et de cuisson, dans le but d'une éventuelle application en milieu spatial.

La première étape, consistant à caractériser la biomasse, portait sur la détermination des propriétés thermiques, colorimétriques et rhéologiques de celle-ci. La spiruline, en tant que riche source de protéines, montre une température de dénaturation des protéines aux alentours de 67°C. L'étude rhéologique montre que la viscosité de la spiruline augmente fortement entre 60 et 80°C, ce qui est cohérent avec la dénaturation des protéines et le phénomène de gélification. Sa viscosité diminuant avec la contrainte de cisaillement fait d'elle un fluide rhéofluidifiant. L'intérêt de cette découverte permet de se rendre compte que la biomasse fraîche est un produit visqueux mais qui se mélange bien et qui peut donc facilement être incorporé dans des préparations alimentaires. Les analyses colorimétriques révèlent que la biomasse fraîche conserve mieux ses pigments, avec des nuances plus vertes et jaunes que la spiruline séchée.

La deuxième étape du travail s'est concentrée sur l'incorporation de la biomasse dans une préparation de pâte à burger, comparant différentes conditions d'incorporation de la spiruline, qu'elle soit fraîche ou sous forme de poudre. Les formulations utilisant la biomasse fraîche ont montré des résultats intéressants mais les burgers à base de poudre préalablement réhydratée présentaient une texture plus ferme. Cependant, ces derniers sont jugés moins attractifs en raison de leur couleur sombre et de leur odeur plus prononcée ce qui appuie l'argument d'utiliser de la biomasse fraîche avec le temps de repos minimal pour la pâte.

La troisième série d'expérimentation s'est portée sur l'étude comparative de différentes méthodes de cuisson : poêle, four, bain thermostaté et cuisson ohmique. Les résultats montrent que la cuisson ohmique offre une texture supérieure par rapport aux méthodes conventionnelles. L'intensité de la cuisson joue son importance au sein de la cuisson ohmique car elle influence significativement le temps de cuisson. La cuisson sous vide produit des burgers trop humides, limitant l'attrait de cette technique pour ce type de produit. Parmi les différentes méthodes testées, la cuisson ohmique se distingue comme étant prometteuse pour l'obtention de burgers microbiens.

Enfin, l'accent a été mis sur l'optimisation de la cuisson ohmique en explorant l'influence des protéines végétales texturées (PVT) et de la concentration en sel sur le processus de cuisson. Les PVT ont montré une influence modérée sur le temps de cuisson et la conductivité électrique, tandis que la concentration en sel a eu un impact significatif sur ces paramètres, suggérant que ces facteurs pourraient être ajustés pour affiner la qualité du produit final. Ces résultats démontrent le potentiel de la cuisson ohmique pour une application en milieu spatial, en offrant une méthode de cuisson rapide, homogène et économiquement avantageuse pour des produits alimentaires à base de spiruline.

Ce travail, s'inscrivant dans le cadre d'un projet novateur, offre de nombreuses pistes d'amélioration. La première concerne l'optimisation des conditions de cuisson ohmique. Par exemple, l'ajout de capteurs de température permettant un suivi en continu serait bénéfique pour mieux contrôler le processus de cuisson. De plus, le développement d'une cellule de cuisson capable de produire un rendu plus uniforme des burgers est crucial. Une telle amélioration permettrait d'obtenir des mesures de texture plus homogènes et donc plus facilement analysables, augmentant la fiabilité des résultats expérimentaux. Pour une application spatiale, il serait pertinent d'améliorer la configuration du four afin de l'adapter aux conditions spécifiques de l'espace. Le système de cuisson devrait être intégré dans une boucle de production fermée. Une option envisageable serait de conditionner tous les ingrédients dans une poche, qui serait ensuite mélangée à l'aide d'un stomacher, avant d'être directement utilisée pour la cuisson. Une étude mentionne déjà le développement de ce type de packaging pour le réchauffement et la stérilisation de produits au sein de navettes spatiales (36).

Ensuite, certaines modifications pourraient être apportées à la recette. Le choix du produit à développer s'est porté sur le burger afin de pouvoir répondre aux exigences de l'ESA, aussi nommés « critères ALISSE ». Les critères jugés les plus importants dans le cadre de ce travail sont les suivants : le produit doit pouvoir être préparé rapidement en un minimum d'étapes, les ingrédients additionnels doivent être à l'état de poudre, le mode de cuisson doit être économique en termes d'énergie et de temps et enfin le produit final doit être solide et ne pas s'émietter. La condition pour laquelle les ingrédients additionnels doivent être à l'état de poudre est donc à investiguer. Il serait pertinent de rechercher des alternatives à l'huile de tournesol étant utilisé dans le cadre de ce travail, limitant ainsi l'usage des ingrédients liquides.

De plus, les contraintes liées à l'approvisionnement en ingrédients dans les navettes spatiales imposent de limiter les apports externes. Cela s'inscrit dans la logique du projet MELiSSA, qui cherche à développer un système de production alimentaire en boucle fermée. Une formulation sans protéines végétales texturées (PVT) devrait également être envisagée.

En ce qui concerne l'acceptabilité du produit, aucun test hédonique n'a encore été réalisé. Il serait donc essentiel d'en planifier pour évaluer la perception des consommateurs face à ce produit innovant. Ces tests permettraient de vérifier si la formulation actuelle est bien acceptée, et si les modifications apportées (réduction d'ingrédients) maintiennent cette acceptabilité.

Au-delà du domaine spatial, le burger de spiruline pourrait également représenter une alternative intéressante sur Terre. Avec une prise de conscience croissante autour du bien-être et de la nutrition, de plus en plus de consommateurs se tournent vers des alternatives végétales. Le développement de ce produit pourrait donc répondre à une demande grandissante, tant pour les astronautes que pour le grand public. Si tel est le cas, il serait important de tester la stabilité du produit dans le temps. En effet, en milieu spatial, la production se ferait en instantanée donc ne poserait pas de problèmes mais sur Terre, la durée de conservation devient un critère crucial.

Enfin, la cuisson ohmique, qui se distingue par son gain d'énergie et de temps, pourrait être étudiée pour une éventuelle utilisation domestique, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'application.

BIBLIOGRAPHIE

1. Saranraj P, Sivasakthi S. SPIRULINA PLATENSIS – FOOD FOR FUTURE: A REVIEW. 2014;4(1).
2. AlFadhly NKZ, Alhelfi N, Altemimi AB, Verma DK, Cacciola F, Narayanankutty A. Trends and Technological Advancements in the Possible Food Applications of Spirulina and Their Health Benefits: A Review. *Molecules*. 2022 Jan;27(17):5584.
3. Fresh living *Arthrospira* as dietary supplements_ Current status and challenges | Elsevier Enhanced Reader [Internet]. [cited 2023 Feb 13]. Available from: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0924224418301481?token=74998A602C812D0AE2FF15A0D0989EB8B2944C19811B99D96C1812C23DC760476C71537DD0B89DF0888094DCEE805FDF&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230213091731>
4. Soni RA, Sudhakar K, Rana RS. Spirulina – From growth to nutritional product: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2017 Nov;69:157–71.
5. Chronakis IS. Gelation of Edible Blue-Green Algae Protein Isolate (*Spirulina platensis* Strain Pacifica): Thermal Transitions, Rheological Properties, and Molecular Forces Involved. *J Agric Food Chem*. 2001 Feb 1;49(2):888–98.
6. Lafarga T, Fernández-Sevilla JM, González-López C, Ación-Fernández FG. Spirulina for the food and functional food industries. *Food Research International*. 2020 Nov 1;137:109356.
7. colloque_spiruline_tulear.pdf [Internet]. [cited 2024 Aug 5]. Available from: https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Culture-spiruline/colloque_spiruline_tulear.pdf#page=32
8. Ötleş S, Pire R. Fatty Acid Composition of *Chlorella* and *Spirulina* Microalgae Species. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*. 2001 Nov 1;84(6):1708–14.
9. Hena S, Znad H, Heong KT, Judd S. Dairy farm wastewater treatment and lipid accumulation by *Arthrospira platensis*. *Water Research*. 2018 Jan;128:267–77.
10. Breuer G, Evers WAC, De Vree JH, Kleinegris DMM, Martens DE, Wijffels RH, et al. Analysis of Fatty Acid Content and Composition in Microalgae. *JoVE*. 2013 Oct 1;(80):50628.
11. Babadzhanov AS, Abdusamatova N, Yusupova FM, Faizullaeva N, Mezhlumyan LG, Malikova MKh. Chemical Composition of *Spirulina platensis* Cultivated in Uzbekistan. *Chemistry of Natural Compounds*. 2004 May;40(3):276–9.
12. Charpy L. « La Spiruline peut-elle être un atout pour la santé et le développement en Afrique ? ».
13. Boutry C, Bos C, Tomé D. Les besoins en acides aminés. *Nutrition Clinique et Métabolisme*. 2008 Dec 1;22(4):151–60.

14. Pez Jaeschke D, Rocha Teixeira I, Damasceno Ferreira Marczak L, Domeneghini Mercali G. Phycocyanin from Spirulina: A review of extraction methods and stability. *Food Research International*. 2021 May;143:110314.
15. Fernández-Rojas B, Hernández-Juárez J, Pedraza-Chaverri J. Nutraceutical properties of phycocyanin. *Journal of Functional Foods*. 2014 Nov;11:375–92.
16. Ferreira-Santos P, Nunes R, De Biasio F, Spigno G, Gorgoglione D, Teixeira JA, et al. Influence of thermal and electrical effects of ohmic heating on C-phycocyanin properties and biocompounds recovery from *Spirulina platensis*. *LWT*. 2020 Jun 1;128:109491.
17. Grosshagauer S, Kraemer K, Somoza V. The True Value of Spirulina. *J Agric Food Chem*. 2020 Apr 8;68(14):4109–15.
18. Khan Z, Bhadouria P, Bisen P. Nutritional and Therapeutic Potential of Spirulina. *CPB*. 2005 Oct 1;6(5):373–9.
19. Tang G, Suter PM. Vitamin A, Nutrition, and Health Values of Algae: Spirulina, Chlorella, and Dunaliella. *Journal of Pharmacy and Nutrition Sciences*. 2011 Jan 5;1(2):111–8.
20. Girardin-Andréani C. Spiruline: système sanguin, système immunitaire et cancer*. *Phytotherapy*. 2005 Aug;3(4):158–61.
21. Trotta T, Porro C, Cianciulli A, Panaro MA. Beneficial Effects of Spirulina Consumption on Brain Health. *Nutrients*. 2022 Jan;14(3):676.
22. Durdakova M, Kolackova M, Ridoskova A, Cernei N, Pavelicova K, Urbis P, et al. Exploring the potential nutritional benefits of *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris*: A focus on vitamin B12, amino acids, and micronutrients. *Food Chemistry*. 2024 Sep 15;452:139434.
23. Falquet J. THE NUTRITIONAL ASPECTS OF SPIRULINA.
24. Bchir B, Felfoul I, Bouaziz MA, Gharred T, Yaich H, Noumi E, et al. Investigation of physicochemical, nutritional, textural, and sensory properties of yoghurt fortified with fresh and dried Spirulina (*Arthrospira platensis*). 2019;26(5):1565–76.
25. Ughetti A, D'Eusanio V, Strani L, Russo AL, Roncaglia F. Influence of Drying and Storage Conditions on the Volatile Organic Compounds Profile of Spirulina Platensis. *Separations*. 2024 Jun;11(6):180.
26. Koli DK, Rudra SG, Bhowmik A, Pabbi S. Nutritional, Functional, Textural and Sensory Evaluation of Spirulina Enriched Green Pasta: A Potential Dietary and Health Supplement. *Foods*. 2022 Jan;11(7):979.
27. Hussien A, Ibrahim G, Kamil M, El-Shamarka M, Mostafa S, Mohamed D. Spirulina-Enriched Pasta as Functional Food Rich in Protein and Antioxidant. 2021 Jan 1;14736–50.
28. Lucas BF, Morais MG de, Santos TD, Costa JAV. *Spirulina* for snack enrichment: Nutritional, physical and sensory evaluations. *LWT*. 2018 Apr 1;90:270–6.

29. Fais G, Manca A, Bolognesi F, Borselli M, Concas A, Busutti M, et al. Wide Range Applications of Spirulina: From Earth to Space Missions. *Marine Drugs*. 2022 May;20(5):299.
30. MELISSA : de la recherche spatiale utile sur la Terre [Internet]. [cited 2024 Aug 5]. Available from: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Belgium_-_Francais/MELISSA_de_la_recherche_spatiale_utile_sur_la_Terre
31. Bernhardt S, Schlich E. Impact of different cooking methods on food quality: Retention of lipophilic vitamins in fresh and frozen vegetables. *Journal of Food Engineering*. 2006 Nov 1;77(2):327–33.
32. Kostoglou M, Karapantsios T. Cooking in space: current situation, needs, and perspectives. *Current Opinion in Food Science*. 2023 Jun 1;51:101021.
33. Gavahian M, Tiwari BK, Chu YH, Ting Y, Farahnaky A. Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recent findings, benefits, and limitations. *Trends in Food Science & Technology*. 2019 Apr;86:328–39.
34. Timothée G, Olivier R, Vanessa J, Alain LB. Cuisson d'une pâte céréalière par chauffage ohmique: mise en place d'un modèle numérique et validation expérimentale.
35. Varghese KS, Pandey MC, Radhakrishna K, Bawa AS. Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. *J Food Sci Technol*. 2014 Oct 1;51(10):2304–17.
36. JUN S, Sastry S. Modeling and optimization of ohmic heating of foods inside a flexible package. *Journal of Food Process Engineering*. 2005 Sep 1;28:417–36.
37. Farahnaky A, Kamali E, Golmakani MT, Gavahian M, Mesbahi G, Majzoobi M. Effect of ohmic and microwave cooking on some bioactive compounds of kohlrabi, turnip, potato, and radish. *Food Measure*. 2018 Dec 1;12(4):2561–9.
38. Kaur N, Singh AK. Ohmic Heating: Concept and Applications—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016 Oct 25;56(14):2338–51.
39. Jaeger H, Roth A, Toepfl S, Holzhauser T, Engel KH, Knorr D, et al. Opinion on the use of ohmic heating for the treatment of foods. *Trends in Food Science & Technology*. 2016 Sep 1;55:84–97.
40. Alkanan ZT, Altemimi AB, Al-Hilphy ARS, Watson DG, Pratap-Singh A. Ohmic Heating in the Food Industry: Developments in Concepts and Applications during 2013–2020. *Applied Sciences*. 2021 Jan;11(6):2507.
41. Ramaswamy HS, Marcotte M, Sastry S, Abdelrahim K. Ohmic Heating in Food Processing. *Food Processing*. 2010;
42. Parniakov O, Bals O, Barba FJ, Mykhailyk V, Lebovka N, Vorobiev E. Application of differential scanning calorimetry to estimate quality and nutritional properties of food products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016 May 31;1–24.
43. Bischof JC, He X. Thermal Stability of Proteins. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2006 Mar;1066(1):12–33.

44. Park WS, Kim HJ, Li M, Lim DH, Kim J, Kwak SS, et al. Two Classes of Pigments, Carotenoids and C-Phycocyanin, in Spirulina Powder and Their Antioxidant Activities. *Molecules*. 2018 Aug;23(8):2065.
45. Falquet J. Spiruline Aspects Nutritionnels.
46. Guazzelli E. Rhéologie des fluides complexes.
47. Rao MA. RHEOLOGY OF LIQUID FOODS - A REVIEW ¹. *Journal of Texture Studies*. 1977 Jun;8(2):135–68.
48. Anson ML, Mirsky AE. THE EFFECT OF DENATURATION ON THE VISCOSITY OF PROTEIN SYSTEMS. *Journal of General Physiology*. 1932 Jan 20;15(3):341–50.
49. Pathare PB, Roskilly AP. Quality and Energy Evaluation in Meat Cooking. *Food Eng Rev*. 2016 Dec 1;8(4):435–47.
50. Vu G, Zhou H, McClements DJ. Impact of cooking method on properties of beef and plant-based burgers: Appearance, texture, thermal properties, and shrinkage. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022 Sep 1;9:100355.
51. Glorio Patrucco S, Mabrouki S, Zucchelli E, Tassone S, Brugiapaglia A, Barbera S. Meat and plant-based burgers water dynamics. In *JPN*; 2022 [cited 2024 Aug 13]. Available from: <https://iris.unito.it/handle/2318/1887736>
52. Texture Profile Analysis [Internet]. [cited 2024 Aug 13]. Available from: <https://texturetechnologies.com/resources/texture-profile-analysis>
53. Jonkers N, van Dommelen JAW, Geers MGD. Intrinsic mechanical properties of food in relation to texture parameters. *Mech Time-Depend Mater*. 2022 Jun 1;26(2):323–46.
54. Wee MSM, Goh AT, Stieger M, Forde CG. Correlation of instrumental texture properties from textural profile analysis (TPA) with eating behaviours and macronutrient composition for a wide range of solid foods. *Food Funct*. 2018;9(10):5301–12.
55. Latoch A, Głuchowski A, Czarniecka-Skubina E. Sous-Vide as an Alternative Method of Cooking to Improve the Quality of Meat: A Review. *Foods*. 2023 Jan;12(16):3110.
56. Boudroua K, Mohamed E, Périer C, Robin G, Mourot J. Composition nutritionnelle des acides gras de la viande de bovins de race locale et importée élevées sur du pâturage herbeux. 2014.
57. Goullieux A, Pain JP. Ohmic Heating. In: *Emerging Technologies for Food Processing* [Internet]. Elsevier; 2014 [cited 2024 Aug 14]. p. 399–426. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012411479100022X>
58. Stanley DW, DeMAN JM. STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TEXTURED PROTEINS. *Journal of Texture Studies*. 1978 Jun;9(1–2):59–76.
59. Bakhsh A, Lee EY, Ncho CM, Kim CJ, Son YM, Hwang YH, et al. Quality Characteristics of Meat Analogs through the Incorporation of Textured Vegetable Protein: A Systematic Review. *Foods*. 2022 Jan;11(9):1242.

60. Réduction du sodium [Internet]. [cited 2024 Aug 14]. Available from: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/salt-reduction>
61. Marcotte M, Trigui M, Ramaswamy HS. EFFECT of SALT and CITRIC ACID ON ELECTRICAL CONDUCTIVITIES and OHMIC HEATING of VISCOUS LIQUIDS. J Food Processing Preservation. 2000 Oct;24(5):389–406.