
Conception d'un dessert à base de microalgues en milieu spatial

Auteur : Jerbia, Maroua

Promoteur(s) : Goffin, Dorothée

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en management de l'innovation et de la conception des aliments, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18373>

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.

Conception d'un dessert à base de microalgues en milieu spatial

Promoteur : Dorothee Goffin (Uliège)

Co-promoteur : Pascal Léonard (HeCH)

Partenaire industriel : Zakaria Grevisse (AstroFood)

Travail de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de
Master en Management de l'Innovation et de la Conception
des Aliments

Dohogne Dorian & Jerbia Maroua
Année académique 2022-2023

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons adresser nos plus sincères remerciements et notre reconnaissance aux personnes sans qui ce travail n'aurait pas lieu d'être :

Tout d'abord nous souhaitons remercier la professeur Dorothée Goffin, notre promotrice, pour nous avoir accueilli au sein du Smart Gastronomy Lab (SGL), les précieux conseils reçus, le suivi tout au long du TFE jusqu'à la relecture du travail. Merci également à notre co-promoteur, Monsieur Pascal Léonard pour son suivi.

Nous remercions également Monsieur Zakaria Grevisse, notre parrain industriel, pour ses conseils, son aide ainsi que la spiruline de qualité qu'il nous a fourni durant la réalisation du projet.

Nous souhaitons également remercier Jeanne Verhaegen et Mathieu de Rijdt, doctorants au Smart Gastronomy Lab, ainsi que Adrien Francis et Nathan Codutti pour leurs conseils et leur aide technique durant les laboratoires.

Nous désirons remercier le professeur Eric Haubruge ainsi que Gaëtan Richard pour leurs conseils et remarques pertinentes.

Un merci particulier au Professeur Marie-Laure Fauconnier mais également Sarah Suffys et Franck Michels sans qui nous n'aurions pas pu réaliser le profil aromatique de nos échantillons.

Nous désirons également remercier le professeur Christophe Blecker et Marjorie Servais du TERRA pour nous avoir prêté du matériel.

Nous souhaitons tout aussi remercier May-Lee Cooper qui réalise son TFE au SGL avec qui nous avons partagé des moments de travail et de discussion qui ont permis d'avancer sur nos sujets respectifs.

Nous remercions également très chaleureusement l'équipe de relecture qui a pris du temps en dernière minute : Coline Dumont, Florence Plamont, Zoé Dumont, Anne Sophie Lizin, Véronique Spahn, Sébastien Dohogne et Anne-Marie Schair.

Merci pour votre contribution.

RÉSUMÉ

Cette étude novatrice vise à conceptualiser un dessert spatial innovant, incorporant de la biomasse de microalgues fraîches en réponse à l'évolution de l'alimentation dans un contexte spatial qui intègre une plus grande autonomie, une meilleure diversification nutritionnelle et une amélioration du bien-être des astronautes. En adoptant une méthodologie méthodique, cette recherche allie une exploration bibliographique exhaustive, la sélection de modalités de cuisson adaptées au cadre spatial (à savoir, le micro-ondes et la cuisson ohmique) et une analyse méticuleuse de la composition de la pâte à gaufre. Le concept sélectionné est le mélange d'un mix d'ingrédients secs conditionnés sous vide sur terre avec de la biomasse fraîche microbienne produite en incubateur dans la navette suivi d'une cuisson rapide et directe.

L'approche scientifique mise en œuvre pour développer le "Space Dessert" qui doit à la fois être un produit agréable pour les astronautes, présenter une forte teneur en biomasse fraîche et être produit dans les conditions spatiales (respect des critères ALISSE), est construite autour de plusieurs phases de développement permettant d'intégrer l'ensemble de ces contraintes. Une première étude comparative entre les caractéristiques de gaufres maison fraîches et de gaufres commerciales a été réalisée afin de déterminer une recette de référence. Ensuite, une investigation a été réalisée sur le remplacement des produits frais par des produits secs, ainsi qu'une caractérisation fines des biomasses de microalgues disponibles. La formulation de gaufres enrichies en spiruline fraîche a ensuite permis de déterminer le taux d'enrichissement maximal et d'établir une recette répondant au cahier des charges fonctionnel. Différents modes de cuissons ont ensuite été expérimentés, le gaufrier (référence), la cuisson au four à micro-ondes et au four ohmique. Les résultats obtenus ont pleinement attesté la viabilité conceptuelle, ouvrant ainsi des perspectives pour une alimentation spatiale plus diversifiée et durable, tout en jetant les fondations d'une contribution constructive à l'exploration spatiale de longue durée.

Mot-clés : gaufre, espace, spiruline, microalgues, limnospira, ohmique, micro-ondes, gaufrier, cuisson

ABSTRACT

This innovative study aims to conceptualize a novel space dessert by incorporating fresh microalgae biomass in response to the changing dietary needs in a space context that emphasizes greater autonomy, improved nutritional diversity, and enhanced astronaut well-being. Employing a systematic methodology, this research combines comprehensive literature exploration, selection of cooking methods suitable for the space environment (namely, microwave and ohmic cooking), and a meticulous analysis of waffle batter composition.

The selected concept involves blending a mixture of vacuum-packaged dry ingredients on Earth with freshly cultivated microbial biomass produced in an incubator within the shuttle, followed by a rapid and direct cooking process. The scientific approach employed to develop the "Space Dessert," which must be both palatable for astronauts and have a high content of fresh biomass while adhering to space criteria (ALiSSE standards), is structured around several developmental phases that accommodate these constraints.

An initial comparative study between characteristics of homemade fresh waffles and commercial waffles was conducted to establish a reference recipe. Subsequently, an investigation was carried out on substituting fresh products with dry ingredients, alongside a detailed characterization of available microalgae biomasses. The formulation of waffles enriched with fresh spirulina allowed the determination of the maximum enrichment level and the creation of a recipe that fulfills the functional specifications. Various cooking methods, including the waffle iron (reference), microwave, and ohmic oven cooking, were then experimented with. The obtained results substantiated the conceptual viability, thereby paving the way for more diverse and sustainable space nutrition, while laying the groundwork for a meaningful contribution to long-duration space exploration.

Keywords: Waffle, space, spirulina, microalgae, Limnospira, ohmic, microwave, waffle iron, cooking

TABLE DES ABRÉVIATIONS

ISS	Station spatiale internationale
MA	Microalgues
ESA	Agence Spatiale Européenne
NASA	Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace
R&D	Recherche et développement
CNSA	Administration spatiale nationale chinoise
CNES	Centre national d'études spatiales
ROSCOSMOS	Entreprise d'état pour les activités spatiales
JAXA	Agence d'exploration aérospatiale japonaise
CSA	Agence spatiale canadienne
MELiSSA	Micro-ecological life support system alternative – Alternative de Système de Soutien Vital Micro-Ecologique
GSTP	Programme de technologie de soutien général
SGL	Smart Gastronomy Lab
UI	Unités internationales
AET	Apport énergétique total
NAD	Nicotinamide Adénine Dinucléotide
NADP	Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate
EN/J	Equivalents Niacine par Jour
AGPI	Acide gras polyinsaturé
pH	Potentiel Hydrogène
A_w	Activité de l'eau
DDM	Date de durabilité minimale
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point – système d'analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise
CIE	Commission internationale de l'éclairage
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
CDC	Cahier des charges
CDCF	Cahier des charges fonctionnel

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	III
TABLE DES ABRÉVIATIONS	IV
TABLE DES MATIERES	V
TABLE DES FIGURES	IX
TABLE DES TABLEAUX	XII
TABLE DES FORMULES	XIV
INTRODUCTION	1
CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	1
CONCEPT	2
I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1. L'ALIMENTATION DANS L'ESPACE	3
2. LES ALIMENTS ET LES DESSERTS DANS L'ESPACE	6
3. BESOINS NUTRITIONNELS DE L'ASTRONAUTE	8
3.1. RÉCAPITULATIF DES BESOINS NUTRITIONNELS DE L'ASTRONAUTE	9
3.2. BESOINS EN MACRONUTRIMENTS	11
3.2.1. <i>Besoin énergétique</i>	11
3.2.2. <i>Protéines</i>	12
3.2.3. <i>Lipides</i>	12
3.2.4. <i>Glucides</i>	12
3.2.5. <i>Fibres alimentaires</i>	12
3.2.6. <i>Besoins hydriques</i>	12
3.3. BESOINS EN MICRONUTRIMENTS	13
4. LES MICROALGUES	13
4.1. PROCESSUS DE FABRICATION	13
4.2. COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES	15
4.3. PROPRIÉTÉS / FONCTIONNALITÉS	16
4.4. PROJET MELISSA	16
4.4.1. <i>Les microalgues dans le compartiment C4A (projet MELISSA)</i>	18
4.4.2. <i>ALISSE (advanced Life Support System Evaluator)</i>	19
II. LES DIFFÉRENTS TYPES DE CUISSON	20
1. LA CUISSON THERMIQUE	20
1.1. TECHNIQUE DE LA CUISSON THERMIQUE	20
1.2. RÔLE DE LA CUISSON SUR LES ALIMENTS	20
1.3. LA CUISSON THERMIQUE DANS LE MILIEU SPATIAL	21
2. LA CUISSON MICRO-ONDES	21
2.1. TECHNIQUE DE LA CUISSON MICRO-ONDES	22
2.2. RÔLE DE LA CUISSON MICRO-ONDES SUR LES ALIMENTS	22
2.3. LE FOUR MICRO-ONDES DANS LE MILIEU SPATIAL	24
3. LA CUISSON OHMIQUE	24
3.1. TECHNIQUES DE LA CUISSON OHMIQUE	24

3.2.	AVANTAGES DE LA CUISSON OHMIQUE.....	26
3.3.	DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DU CHAUFFAGE OHMIQUE.....	27
3.4.	APPLICATIONS ET PRODUITS UTILISANT LE CHAUFFAGE OHMIQUE.....	27
3.5.	ADAPTATION DU FOUR EN MILIEU SPATIAL.....	28
4.	COMPARAISON ENTRE LA CUISSON OHMIQUE ET LA CUISSON MICRO-ONDES.....	29
III.	LA PÂTE À GAUFRE	31
1.	LA RECETTE DES GAUFRES	31
2.	PROCESSUS DE FABRICATION D'UNE GAUFRE INDUSTRIELLE ET MAISON.	32
3.	MATIÈRES PREMIÈRES.....	32
3.1.	MIX SEC	33
3.1.1.	Farine de riz	33
3.1.2.	Farine de blé	34
3.1.3.	Le sucre brun.....	34
3.1.4.	le lait et la Poudre de lait entier.....	35
3.1.5.	œufs en poudre.....	36
3.1.6.	Matières grasses.....	38
3.1.7.	Levure chimique.....	38
3.2.	MICROALGUES.....	39
4.	DIAGRAMME DE PRODUCTION	39
5.	SÉCURITÉ ET CONSERVATION	41
A.	LES DANGERS POTENTIELS	41
B.	LIMITES ACCEPTABLES DES DANGERS POTENTIELS.....	44
C.	LIMITE DES RISQUES.....	48
IV.	CAHIER DES CHARGES.....	49
1.	TABLEAU RÉCAPITULATIF	49
2.	SÉCURITÉ	50
2.1.	ACTIVITÉ DE L'EAU.....	50
2.2.	CARACTÉRISATION DES RISQUES.....	51
2.2.1.	Microbiologique.....	51
2.2.2.	Chimique.....	52
2.2.3.	Physique.....	53
2.2.4.	Production dans l'espace.....	53
3.	SOCIÉTÉ	53
3.1.	BESOINS DES ASTRONAUTES.....	53
3.2.	PROVENANCE DES PRODUITS.....	53
3.3.	ETIQUETAGE	53
4.	SERVICE	54
4.1.	CRITÈRES DE L'EMBALLAGE	54
4.2.	PORTIONS	54
4.3.	CONSERVATION	54
5.	SANTÉ.....	54
5.1.	INGRÉDIENTS	54
5.2.	OBJECTIF NUTRITIONNEL.....	55
5.3.	ADDITIFS	55
6.	SATISFACTION.....	55
6.1.	OBJECTIF DE DÉGUSTATION	55
6.2.	TEXTUROMÉTRIE	55
6.3.	CRITÈRES HÉDONIQUES.....	56
6.4.	OBJECTIFS DE PRÉPARATION ET DE CUISSON	56
6.5.	FORME DU PRODUIT FINI	56
V.	ANALYSE DE LA FINANÇABILITÉ.....	58

1.	ETAT DES LIEUX DU MARCHÉ ALIMENTAIRE SPATIAL.....	58
2.	CIBLES.....	59
3.	RÔLE ET PROCÉDURES.....	59
VI.	RÉALISATION DU SPACE DESSERT	61
1.	INTRODUCTION.....	61
2.	MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	64
2.1.	DÉNOMINATION DES ÉCHANTILLONS	64
2.2.	INGRÉDIENTS.....	65
2.3.	FORMULATION DES GAUFRES	66
2.4.	MÉTHODE DE PRÉPARATION.....	68
2.5.	MÉTHODES DE CUISSON.....	68
2.5.1.	<i>Cuisson classique au gaufrier.....</i>	<i>68</i>
2.5.2.	<i>Cuisson au four à micro-ondes</i>	<i>69</i>
2.5.2.	<i>Cuisson au four Ohmique.....</i>	<i>70</i>
2.6.	CARACTÉRISATION DES CUISSONS	71
2.6.1.	<i>Impact de la cuisson sur la masse du produit</i>	<i>71</i>
2.6.2.	<i>Température.....</i>	<i>71</i>
2.6.3.	<i>Métriques et masse volumique.....</i>	<i>71</i>
2.6.4.	<i>Score total de dégustation.....</i>	<i>73</i>
2.6.5.	<i>Analyse de la texture</i>	<i>73</i>
2.7.	CARACTÉRISATION DES BIOMASSES DE SPIRULINE.....	75
2.8.	ANALYSES DES COMPOSÉS AROMATIQUES	76
2.9.	ACTIVITÉ DE L'EAU DE LA POUDRE DE GAUFRE (SPIRULINE).....	77
2.10.	COLORIMÉTRIE	77
2.11.	VALEURS NUTRITIONNELLES	77
2.12.	ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES.....	77
3.	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	78
3.1.	CARACTÉRISTIQUES D'UNE GAUFRE MAISON ET DU COMMERCE.....	78
3.1.1.	<i>Impact de la cuisson</i>	<i>78</i>
3.1.2.	<i>Score total de dégustation.....</i>	<i>81</i>
3.1.3.	<i>Analyses de la texture.....</i>	<i>82</i>
3.1.4.	<i>Conclusions</i>	<i>83</i>
3.2.	CARACTÉRISTIQUES D'UNE GAUFRE MAISON AVEC DES PRODUITS DÉSHYDRATÉS.....	83
3.2.1.	<i>Impact de la cuisson</i>	<i>84</i>
3.2.2.	<i>Score total de dégustation.....</i>	<i>87</i>
3.2.3.	<i>Analyses de la texture.....</i>	<i>90</i>
3.2.4.	<i>Conclusions</i>	<i>91</i>
3.3.	CARACTÉRISATION DES BIOMASSES ET DES GAUFRES À BASE DE SPIRULINE.....	92
3.3.1.	<i>Colorimétrie et activité de l'eau des ingrédients</i>	<i>92</i>
3.3.2.	<i>Impact de la cuisson</i>	<i>93</i>
3.3.3.	<i>Score total de dégustation.....</i>	<i>99</i>
3.3.4.	<i>Analyses de la texture.....</i>	<i>103</i>
3.3.5.	<i>Cinétique de température et de conductivité de la cuisson ohmique</i>	<i>106</i>
3.3.6.	<i>Analyses des composés aromatiques.....</i>	<i>109</i>
3.3.7.	<i>Conclusions</i>	<i>112</i>
4.	VALIDATION DU CAHIER DES CHARGES	113
4.1.	SÉCURITÉ	113
4.2.	SOCIÉTÉ	113
4.3.	SERVICE	113
4.4.	SANTÉ	113
4.5.	SATISFACTION.....	114
5.	PERSPECTIVES	114
5.1.	MASSE VOLUMIQUE.....	114
5.2.	TESTS DE VIEILLISSEMENT	115
5.3.	DÉGUSTATION PAR UN PANEL	116

5.3.1.	<i>Réalisation d'un test hédonique</i>	116
5.3.2.	<i>réalisation d'un test discriminatif</i>	116
5.4.	PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION DE LA CUISSON OHMIQUE	117
6.	CONCLUSIONS	117
VII.	LES EMBALLAGES	119
1.	LES MATÉRIAUX D'EMBALLAGES UTILISÉS DANS LE SECTEUR	119
1.1.	LE SAC AUTOCLAVE	119
1.2.	EMBALLAGE DIT « À HAUTE BARRIÈRE »	120
1.3.	MATÉRIAUX D'EMBALLAGES ALTERNATIFS ET ÉCO-CONÇUS.....	120
2.	CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU PACKAGING	121
3.	PROPOSITION D'EMBALLAGE	123
3.1.	EMBALLAGE SOUS-VIDE POUR LA CUISSON OHMIQUE	123
3.2.	ALTERNATIVE D'EMBALLAGE RECYCLABLE.....	125
VIII.	CONCLUSIONS	127
1.	FAIBLESSES	127
2.	CONCLUSION GÉNÉRALE	127
IX.	RÉFÉRENCES	130
1.	BIBLIOGRAPHIE	130
2.	WEBOGRAPHIE	149
ANNEXES	A	
LISTE DES ANNEXES	A	
ANNEXE I.	BESOINS EN MICRONUTRIMENTS DE L'ASTRONAUTE	B
ANNEXE II.	COMPOSITIONS NUTRITIONNELS DES MATIÈRES PREMIÈRES	J
ANNEXE III.	QUESTIONNAIRE DE DÉGUSTATION PERSONNEL DES ÉCHANTILLONS	N
ANNEXE IV.	DÉTAIL DES SCORES ATTRIBUÉS AUX DIFFÉRENTS ÉCHANTILLONS	R

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : les besoins que doit satisfaire le système alimentaire spatial (Douglas et al., 2020).	4
Figure 2 : Thomas Pesquet dans l'ISS (Source : RTL.fr)	6
Figure 3 : Présentation de la cuisine de l'ISS par Thomas Pesquet (Source : LeHuffPost)	7
Figure 4 : Mesures visant à atténuer les adaptations métaboliques défavorables induites par l'apesanteur (Bergouignan et al., 2016).	9
Figure 5 : schéma illustrant les compartiments de la dépense énergétique (von Loeffelholz et al., 2000)	11
Figure 6 : Comparaison entre la production d'arthrospira fraîche et sèche (Ma et al., 2019).	14
Figure 7 : système de production des microalgues en milieu fermé(Wahby, 2016)	14
Figure 8 : Schéma d'un écosystème sur lequel se base les différents modules du système MELISSA. (Source : ESA).....	17
Figure 9 : Représentation schématique des deux principaux mécanismes liés au chauffage par micro-ondes : la rotation dipolaire et la conduction ionique (Curet, 2019).	22
Figure 10 : Schéma représentatif d'un four ohmique pour la cuisson d'aliments (Gavahian et al., 2019).	25
Figure 11 : différentes configurations de la cuisson ohmique (Gally et al., 2016).....	27
Figure 12 : Four ohmique à l'échelle pilote Mod. SPP 1.5.	29
Figure 13 : Diagramme de fabrication des gaufres industrielles, faites maison et pour le milieu spatial	32
Figure 14 : Facteur de gonflement de l'amidon de riz en fonction de la température (Chung et al., 2011)	33
Figure 15 : Schéma illustrant les propriétés fonctionnelles des protéines de l'œuf dans les cakes; EW: egg white, TAGs: triacylglycérols (Kiosseoglou et al., 2005).....	38
Figure 16 : Diagramme de production du Space Dessert	40
Figure 17 : Concept de la production d'une gaufre cuite au four ohmique en milieu spatial.	40
Figure 18 : Taux relatif des principaux agents de dégradation des matrices organiques en fonction de l'A _w (Baldet et al., 2012).	51
Figure 19 : ESA-STAR registration (source : ESA)	60
Figure 20 : premier essai de l'incorporation de spiruline sèche et fraîche dans la pâte à gaufre	62
Figure 21 : différence de cuisson entre une gaufre préparée manuellement (au-dessus) et une gaufre préparée à l'aide d'un mixeur (en-dessous)	62
Figure 22 : Protocole expérimentale de la conception du Space Dessert	63
Figure 23 : températures mesurées à la puissance 3 du gaufrier Waffle Maker SWE 1200 A1 de SilverCrest (rouge = 159,3±19,9°C ; vert = 154,9 ±12,7°C ; Bleu = 153,9±14,0°C).	69
Figure 24 : Schéma expérimental de la cuisson au micro-ondes (dimensions en mm).	70
Figure 25 : Cellule de cuisson (tuyau en polycarbonate).....	70
Figure 26 : emplacement de la pénétration de la sonde pour la mesure de la température des échantillons au gaufrier, four à micro-ondes et four ohmique de gauche à droite.....	71
Figure 27 : Schéma du pied à coulisse	72
Figure 28 : découpe d'un échantillon de gaufre cuite au four ohmique pour l'analyse texturométrique	74

Figure 29 : protocole de production des gaufres aux produits frais et analyses des gaufres du commerce.....	78
Figure 30 : Évolution de la hauteur de la gaufre à la cuisson classique aux produits frais cuites au micro-ondes	79
Figure 31 : comparaison des masses volumiques des gaufres classiques aux produits frais cuites au micro-ondes.....	80
Figure 32 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres classiques aux produits frais.....	80
Figure 33 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits frais	81
Figure 34 : photos de la cuisson de la gaufre Cf.B.G.....	82
Figure 35 : photos de la cuisson de la gaufre Cf.B.MW.9	82
Figure 36 : diagramme de la dureté, de la masticabilité et de la fracture des gaufres classiques aux produits frais.....	83
Figure 37 : Protocole de production des gaufres à base de produits déshydratés.....	84
Figure 38 : Evolution de la hauteur à la cuisson des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au micro-ondes	85
Figure 39 : comparaison des masses volumiques des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au micro-ondes	86
Figure 40 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au gaufrier	86
Figure 41 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au micro-ondes.....	87
Figure 42 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au gaufrier	88
Figure 43 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au micro-ondes.....	89
Figure 44 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits déshydratés comparées aux gaufres classiques aux produits frais.....	89
Figure 45 : photo de la cuisson interne des échantillons Cs.B.MW#B, Cs.B.MW#Mi et Cs.B.MW#SMG (de gauche à droite).....	90
Figure 46 : photo de la cuisson interne des échantillons Cs.R.MW#B, Cs.R.MW#Mi et Cs.R.MW#SMG (de gauche à droite).....	90
Figure 47 : diagramme de la dureté, de la Masticabilité et de la fracture des gaufres classiques aux produits séchés cuites au gaufrier.	91
Figure 48 : diagramme de la dureté, de la Masticabilité et de la fracture des gaufres classiques aux produits séchés cuites au micro-ondes.	91
Figure 49 : protocole de production des gaufres à base de spiruline fraîche et analyses complémentaires.....	92
Figure 50 : Distribution des températures atteinte lors de la cuisson des gaufres (tous résultats confondus).....	94
Figure 51 : Evolution de la hauteur à la cuisson des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique	95
Figure 52 : Evolution de la hauteur à la cuisson des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique et au micro-ondes.....	95
Figure 53 : comparaison des masses volumiques des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique. .	96

Figure 54 : comparaison des masses volumiques des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique et au micro-ondes.	96
Figure 55 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique.	97
Figure 56 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres à la spiruline AstroFood cuites au four ohmique, au micro-ondes et au gaufrier.	98
Figure 57 : distribution du pourcentage de réduction de poids par type de cuisson (tous résultats confondus).....	98
Figure 58 : représentation en toile des STD des gaufres à la spiruline fraîche cuites au four ohmique.	100
Figure 59 : représentation en toile des STD des gaufres à la spiruline fraîche comparées aux gaufres classiques aux produits frais et aux gaufres classiques aux produits déshydratés.	100
Figure 60 : distribution des STD en fonction du mode de cuisson et du type de farine (tous résultats confondus).....	101
Figure 61 : impact de la spiruline fraîche sur l'acceptabilité du produit et sur le STD.....	102
Figure 62 : Photo de la cuisson des gaufres Sf.R.B#Sas à gauche et Sf.R.B#Set à droite	102
Figure 63 : Photo de la cuisson des gaufres Sf.R.MW#Sas à gauche et Sf.R.MW#Set à droite.....	103
Figure 64 : diagramme de la dureté, de la masticabilité et de la fracture des gaufres à la spiruline fraîche cuites au four ohmique.....	104
Figure 65 : diagramme de la dureté, de la masticabilité et de la fracture des gaufres à la spiruline fraîche en comparaison aux gaufres classiques.	104
Figure 66 : Influence de la dureté, de la masticabilité et de la fracture du produit en fonction du mode de cuisson (tous résultats confondus)	105
Figure 67 : Influence de la dureté, de la masticabilité et de la fracture du produit en fonction du type de farine (tous résultats confondus).....	106
Figure 68 : évolution des température des gaufres cuites au four ohmique dans le temps en fonction du voltage.	107
Figure 69 : évolution de la conductivité des gaufres cuites au four ohmique dans le temps en fonction du voltage.	108
Figure 70 : corrélation entre la température et la conductivité durant la cuisson des gaufres au four ohmique.....	108
Figure 71 : Profil aromatique des gaufres Cs.R.G#SMG (CSRG) et Sf.R.G#Sas (SFRG) exprimée en log de l'OAV.	112
Figure 72 : Profil aromatique de la spiruline fraîche AstroFood (AS), de la spiruline fraîche ETIKA (ET) et de la spiruline séchée ETIKA (ETS) exprimée en log de l'OAV.....	112
Figure 73 : photos de la cuisson de la gaufre Sf.R.OH.V2#Sas	113
Figure 74 : Schéma d'un packaging flexible avec des électrodes flexibles (Jun et al., 2005).	124
Figure 75 : différentes configurations des électrodes dans l'emballage flexible (Jun et al., 2005)	124
Figure 76 : Proposition d'emballage pour la cuisson d'une portion de gaufre à base de spiruline fraîche.	125
Figure (Dusso et al., 2005) : Synthèse, activation et catabolisme de la vitamine D (Sacheck et al., 2001)	F

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Systèmes du corps humain affectés lors des missions spatiales (Khoshvaghti, 2019).....	8
Tableau 2 : besoins nutritionnels de l'astronaute	10
Tableau 3 : composés bioactifs principaux des microalgues et leurs fonctions sur le corps (Gohara-Beirigo et al., 2022).....	15
Tableau 4 : Rôles et utilisations des différents compartiment du projet MELiSSA.....	17
Tableau 5 : Conductivité électrique des aliments (Maloney & Harrison, 2016)	28
Tableau 6 : Tableau d'analyse comparative des différentes caractéristiques entre deux méthodes de cuisson : la cuisson ohmique et la cuisson par micro-ondes	29
Tableau 7 : Recette de gaufres faciles et légères (source : Marmiton)	31
Tableau 8 : Composition nutritionnelle de la poudre d'œuf entier (portion individuelle : 15g) (Source : Tables Ciqua).....	37
Tableau 9 : Liste des dangers potentiels par étape avec leurs causes primaires (CP), leurs causes secondaires et les dangers potentiels. (P = personnel ; O = opération ; M = Matériel ; I = intrants ; E = environnement) (rouge = risques microbiologique ; bleu = risques chimiques ; vert = risques physiques)	41
Tableau 10 : Evaluation des dangers potentiels et niveau acceptable en sortie de production du produit (réhydraté), (rouge = risques microbiologique ; bleu = risques chimiques ; vert = risques physiques)	45
Tableau 11 : Récapitulatif du cahier des charges du Space Dessert.....	49
Tableau 12 : Limites microbiologiques acceptables pour le mélange de poudres	51
Tableau 13 : Limites chimiques acceptables pour le mélange de poudres.....	52
Tableau 14 : Limites physiques acceptables pour le mélange de poudres	53
Tableau 15 : paramètres texturométriques et leurs valeurs cible pour le cahier des charges.....	56
Tableau 16 : Rôles des acteurs clés dans le marché alimentaire spatial et leurs produits proposés ...	58
Tableau 17 : tableau explicatif des noms des échantillons.....	65
Tableau 18 : Références des ingrédients utilisés pour la réalisation des essais	65
Tableau 19 : quantités des ingrédients pour une gaufre classique maison.....	66
Tableau 20 : masse humide des ingrédients utilisés dans la préparation des gaufres (Référence : ciqua.anses.fr).....	67
Tableau 21 : quantités des ingrédients pour une gaufre à base de produits secs.....	67
Tableau 22 : quantités des ingrédients pour une gaufre à base de spiruline	67
Tableau 23 : Récapitulatif des méthode de cuisson	68
Tableau 24 : Importance et référentiel utilisé pour le calcul du score total de dégustation (Importance : 1=peu important, 2=important, 3=très important)	73
Tableau 25 : Paramètres fixes du texturomètre pour la compression.	74
Tableau 26 : caractéristiques de la spiruline ASTROFOOD et de la spiruline ETIKA.....	75
Tableau 27 : détails des paramètres de la chromatographie en phase gazeuse.	76
Tableau 28 : résultats des mesures des gaufres classiques aux produits frais	79
Tableau 29 : Résultats des scores totaux de dégustation des gaufres classiques aux produits frais....	81
Tableau 30 : Données texturométriques des gaufres classiques aux produits frais.....	82
Tableau 31 : résultats des mesures des gaufres classiques aux produits déshydratés	84
Tableau 32 : Résultats des scores totaux de dégustation des gaufres classiques aux produits déshydratés.	87

Tableau 33 : Données texturométriques des gaufres classiques aux produits déshydratés.	90
Tableau 34 : résultats de l'analyse colorimétriques de la spiruline fraîche d'AstroFood, d'Etika, du mélange de poudres, des gaufres Sf.R.G#Sas et Sf.R.OH.V2#Sas avec leur couleur correspondante. .	93
Tableau 35 : activité de l'eau du mélange de poudre.....	93
Tableau 36 : résultats des mesures des gaufres à la spiruline fraîche.....	94
Tableau 37 : Résultats des scores totaux de dégustation des gaufres à la spiruline fraîche.	99
Tableau 38 : Données texturométriques des gaufres à la spiruline fraîche.	103
Tableau 39 : cinétique de température et de conductivité de la cuisson ohmique sur les gaufres Cs.R.OH#SMG et Sf.R.OH#Sas en fonction du voltage.....	106
Tableau 40 : Principaux composés organiques volatils (COV) identifiés dans la spiruline fraîche d'Etika (Spiruline ET), la spiruline fraîche d'Astrofood (spiruline As), la spiruline sèche d'Etika (ETS), des gaufres Cs.R.G#SMG (CSRG) et Sf.R.G#Sas (SFRG) (% de surface > 5 %) avec leur description aromatique et leur seuil de perception.	109
Tableau 41 : valeurs nutritionnelles de la gaufre Sf.R.OH.V2#Sas.....	114
Tableau 42 : Description des différentes couches d'un sac autoclave (Kropf et al., 2014; Martinez-Ceniceros et al., 2022)	120
Tableau 43 : Cahier des charges fonctionnel de l'emballage de la poudre à mélanger (Léonard, 2021)	121
Tableau 44 : composition nutritionnelle de la farine de riz (source : Ciqua, ANSES).....	J
Tableau 45 : composition nutritionnelle de la farine de blé (source : Ciqua, ANSES).....	K
Tableau 46 : composition nutritionnelle du sucre brun (Takahashi et al., 2016)	K
Tableau 47 : Informations nutritionnelles de la poudre de lait entier (Source : CIQUAL)	L
Tableau 48 : Composition nutritionnelle de l'Arthrospira platensis (Revellame et al., 2021)	M
Tableau 49 : détails des scores attribués aux différents échantillons	R

TABLE DES FORMULES

Équation 1 : Calcul de l'AET pour les hommes âgés de 19 ans ou plus (NASA JSC, 2005)	11
Équation 2 : Calcul de l'AET pour les femmes âgées de 19 ans ou plus (NASA JSC, 2005)	11
Équation 3 : Formule de l' A_w	50
Équation 4 : calcul de la masse humide total d'un produit.....	66
Équation 5 : formule d'équivalence d'un produit sec sur base d'un produit entier	67
Équation 6 : Pourcentage de réduction de la masse après la cuisson d'un échantillon	71
Équation 7 : Masse volumique des échantillons.....	73
Équation 8 : Score total de dégustation	73

INTRODUCTION

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

L'espace est un milieu hostile, se retrouver dans cet environnement pose de nombreuses contraintes. D'un point de vue alimentaire, des adaptations et des nouvelles technologies ont émergé afin de pallier les contraintes telles que la pression, l'absence de gravité, le volume réduit des navettes, la durée des voyages, la stabilité des produits face aux radiations etc. (Hollender et al., 1970). L'alimentation spatiale s'est fortement développée autour des premiers programmes spatiaux, notamment Apollo (1968-1972) où les astronautes ont, pour la première fois, utilisé des ustensiles, de l'eau chaude pour réhydrater afin de tenter de se rapprocher d'une alimentation dite "normale" (Perchonok et al., 2002).

Actuellement, les missions au sein de la station spatiale internationale (ISS) ne permettent pas d'être approvisionnées en produits frais tous les jours car celles-ci durent plusieurs mois sans ravitaillement, nécessitant des produits traités en amont afin d'augmenter leur durée de conservation. D'autres restrictions telles que l'absence de production de miettes ou l'écoulement de liquides dans l'espace de vie de la navette et qui pourraient se coincer dans des espaces restreints sont à prendre en considération¹. Néanmoins, proposer une alimentation la plus proche de celle consommée sur terre est un des objectifs dans l'ISS. A l'exception de la nourriture fraîche proposée lors des jours de ravitaillement, le reste des denrées a subi un traitement de conservation : traitement thermique, lyophilisation, déshydratation ou encore irradiation (Perchonok et al., 2002; Jiang et al., 2020).

Les missions dans un futur proche seront de plus en plus longues, pouvant s'étaler sur plusieurs années (Perchonok et al., 2002). La qualité nutritionnelle et les effets sur la santé des denrées sont également des enjeux de taille compte tenu des besoins spécifiques des astronautes et des dégradations physiques subies par ceux-ci lors des voyages de longue durée (Obrist et al., 2019). Cependant, actuellement, l'application de traitements thermiques dégrade la qualité nutritive des aliments (Evans et al., 1981; Cooper et al., 2011). Il est également nécessaire de concevoir des aliments agréables et conviviaux car l'appréciation des produits et leur potentiel de convivialité participent largement à une bonne alimentation (Obrist et al., 2019). Enfin, l'équilibre psychologique des astronautes est un facteur de réussite important pour les futures missions (Suedfeld, 2003; Szocik et al., 2018). Dans ce contexte, une alimentation fraîche, saine et agréable contribuerait de façon positive au moral des astronautes mais également à leur santé (Katayama et al., 2009).

Dans ce contexte, l'Agence Spatiale Européenne développe actuellement de nombreux projets permettant d'augmenter l'autonomie dans le milieu spatial et notamment focalisés sur le développement de techniques de production et de transformation d'aliments en milieu spatial (au sein des navettes, de l'ISS ou encore sur Mars). Notamment, la Fondation MELISSA a pour objectif de préparer les prochaines missions habitées en améliorant leur autonomie ; le système MELISSA permet la production d'oxygène, d'eau et de nourriture grâce à un processus de recyclage².

Un enjeu important est notamment la production de denrées alimentaires fraîches in situ riches en protéines et en micronutriments permettant de répondre aux besoins des astronautes. Un modèle d'incubateur permettant la production durable de biomasse microbienne fraîche de type Spiruline

¹ L'alimentation dans la station spatiale internationale – Interview de Thomas Pesquet | Chaîne : Initiative.fr. 12/10/2017. YouTube. Consulté le 10 décembre 2022, https://www.youtube.com/watch?v=WJ36xkDhQn0&ab_channel=Initiatives.fr

² FAQ – Foires aux questions sur le projet MELISSA | N.D. MELISSA FOUNDATION. Consulté le 31 décembre 2022, <https://www.melissafoundation.org/page/faq>

(*Limnospira indica*) et adapté au contexte spatial est actuellement en cours de développement par l'ESA. D'autre part, ces ingrédients doivent ensuite être intégrés à des préparations afin de produire, toujours dans les conditions spatiales, des denrées alimentaires à haute densité nutritionnelle et agréables.

CONCEPT

Afin de contribuer à ces nouvelles recherches dans le secteur spatial et notamment le développement de nouveaux produits alimentaires et de nouvelles techniques culinaires associées incluant des ingrédients frais en milieu spatial, il a été décidé de mettre au point d'une part, un dessert intégrant un maximum de biomasse microbienne fraîche cultivée in situ dans un module de l'ISS et d'autre part, le procédé de fabrication de celui-ci en respectant les contraintes liées au milieu spatial en prenant en compte les critères ALISSE (Advanced Life Support System Evaluator) qui permettent d'évaluer l'adaptation d'une technologie à une utilisation dans un système de vie dans l'espace.

Le développement d'un dessert a été choisi car il s'agit d'un produit qui se partage, qui se mange avec ses proches et il possède un aspect social et convivial. Le modèle choisi est la gaufre qui est un dessert de portion individuelle, apprécié et largement consommé et qui ne produit pas de miettes.

La technique de cuisson ohmique est développée et comparée avec une autre technique déjà mise en œuvre dans l'espace, la cuisson au micro-ondes. Cette cuisson qui est également une méthode volumétrique basée sur l'effet joule qui permet une optimisation de la consommation en énergie (Bender et al., 2019). Cette technique ne devrait, en outre, pas être impactée par l'absence de gravité. Le système proposé pourrait par la suite être intégré dans le compartiment IV de l'ISS afin de proposer des aliments frais et de haute valeur nutritionnelle³.

³ PHOTOBIOREACTOR – Explications du photobioreactor du système MELISSA | N.D. MELISSA FOUNDATION. Consulté le 15/12/22, <https://www.melissafoundation.org/page/photobioreactor>

I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. L'ALIMENTATION DANS L'ESPACE

Cette première partie a pour but de présenter les spécificités liées à une alimentation dans des conditions spatiales c'est-à-dire en microgravité et exposé à des radiations et de plus en plus en autonomie partielle. Il convient dès lors de faire état, d'une part, des besoins spécifiques des astronautes dans ces conditions et, d'autre part, des contraintes techniques qui auront un impact sur la forme, la formulation, le packaging des denrées alimentaires, sur le mode de préparation et de consommation. L'alimentation constitue un point d'attention crucial lors des missions spatiales. En effet, Les astronautes sont soumis à des conditions extrêmes lors de leurs missions spatiales, ce qui implique de maintenir un régime alimentaire adéquat afin d'assurer leur santé et leur bien-être. L'alimentation doit répondre aux besoins physiologiques des astronautes et limiter la perte de poids liée à l'apesanteur, mais elle participe également largement au bien-être psychologique. Les facteurs pouvant affecter la santé mentale des astronautes sont divers : le milieu fermé, l'horaire de travail, les conflits culturels et interpersonnels, l'absence de gravité et les radiations, l'isolation et la solitude, les contacts sociaux limités, le manque de communication avec la terre, la dépendance aux technologies pour vivre et travailler... (Häuplik-Meusburger et al., 2021; Oluwafemi et al., 2021). Manger est un moment de détente, de bien-être et qui procure du plaisir (Katayama et al., 2009). Il est difficile d'atteindre les besoins nutritionnels dans un environnement clos avec des aliments peu variés. L'acceptabilité et la palatabilité doivent donc être importantes sachant que le goût des aliments change et diminue dans ces conditions de manière générale. Pour améliorer l'acceptabilité, il est préférable d'avoir une alimentation classique, variée, agréable et savoureuse ; remplacer l'alimentation par des substituts hypercaloriques diminue l'appétence, les calories ingérées et favorise la perte de poids, malgré la motivation, le niveau intellectuel supérieur et la conscience de l'importance de s'alimenter correctement des astronautes (Sirmons et al., 2020; Taylor et al., 2020). La Figure 1 résume les besoins du système alimentaire spatial (Douglas et al., 2020).

La nourriture des astronautes fait partie d'une catégorie spéciale d'aliments conçus pour être consommés dans l'environnement spatial. Elle doit être de petite taille et de faible poids afin de faciliter le transport et la manipulation, ainsi que résistante aux effets néfastes des vibrations au décollage, des rayonnements et de l'environnement atypique, comme la basse pression. Par rapport à la nourriture terrestre, la nourriture spatiale a une composition et un mode de stockage différent. (Sun et al., 2014).

Auparavant, le choix alimentaire était limité. Actuellement, ils ont accès à une gamme élargie de denrées alimentaires mais doivent toujours s'en tenir à un régime équilibré qui tient compte des spécificités liées à la vie dans l'espace.

En effet, au début des années 1960, la nourriture était principalement proposée sous forme lyophilisée ou sous forme de pâte, dans des tubes munis d'un dispositif de consommation directe. La première denrée alimentaire consommée par un astronaute américain dans l'espace, lors de la mission Mercure 3 en août 1962, était une compote de pommes emballée dans un tube en aluminium (Klicka et al., 1982)

Outre les aliments en tube, il existe des aliments en cubes de la taille d'une bouchée, emballés par un stratifié en plastique transparent (Klicka et al., 1982). Ces cubes ont été formés à partir de produits céréaliers en les soumettant à une pression élevée. Ils contiennent un mélange riche en calories,

protéines, matières grasses à point de fusion élevé, sucre et fruits / noix ; ils ont été recouverts d'un revêtement de gélatine pour empêcher les miettes de contaminer la cabine (Heidelbaugh, 1966).

L'évolution de la complexité des systèmes alimentaires a été continue au cours de l'exploration spatiale. Les astronautes disposent actuellement d'une alimentation équilibrée et diversifiée, grâce à des réapprovisionnements réguliers de vivres frais tous les six mois environ. Cependant, cela est possible car ils sont généralement proches de la Terre et peuvent recevoir ces réapprovisionnements. A mesure que la durée des missions augmentait, il était devenu crucial de fournir une nutrition de qualité supérieure, une variété accrue d'aliments et des aliments facilement consommables pour répondre aux besoins des astronautes (Lane et al., 1994). D'autre part, les aliments frais sont nécessaires pour le bon déroulement d'une mission longue durée en dehors de l'orbite terrestre que ce soit d'un point de vue physiologique ou psychologique. Ils sont attendus par les astronautes à chaque ravitaillement et cela procure beaucoup de plaisir lors de ce moment spécial. La production d'aliments frais dans l'ISS est pour le moment trop limitée et encore en voie de développement (Tang et al., 2022). Pour ces missions de longue durée, il sera probablement nécessaire de développer des moyens de production alimentaire autonomes afin de garantir une alimentation suffisante et variée pour les astronautes et augmenter l'autonomie (Bush, 2020). Dans cette voie, les systèmes biologiques autonomes et de recyclage sont en phase de développement notamment avec le système MELiSSA développé en page 13. D'autres technologies pourraient également se développer telle l'impression 3D alimentaire qui permettrait de reconstituer des aliments à partir de poudre ou de pâtes. (Blomqvist, 2020)

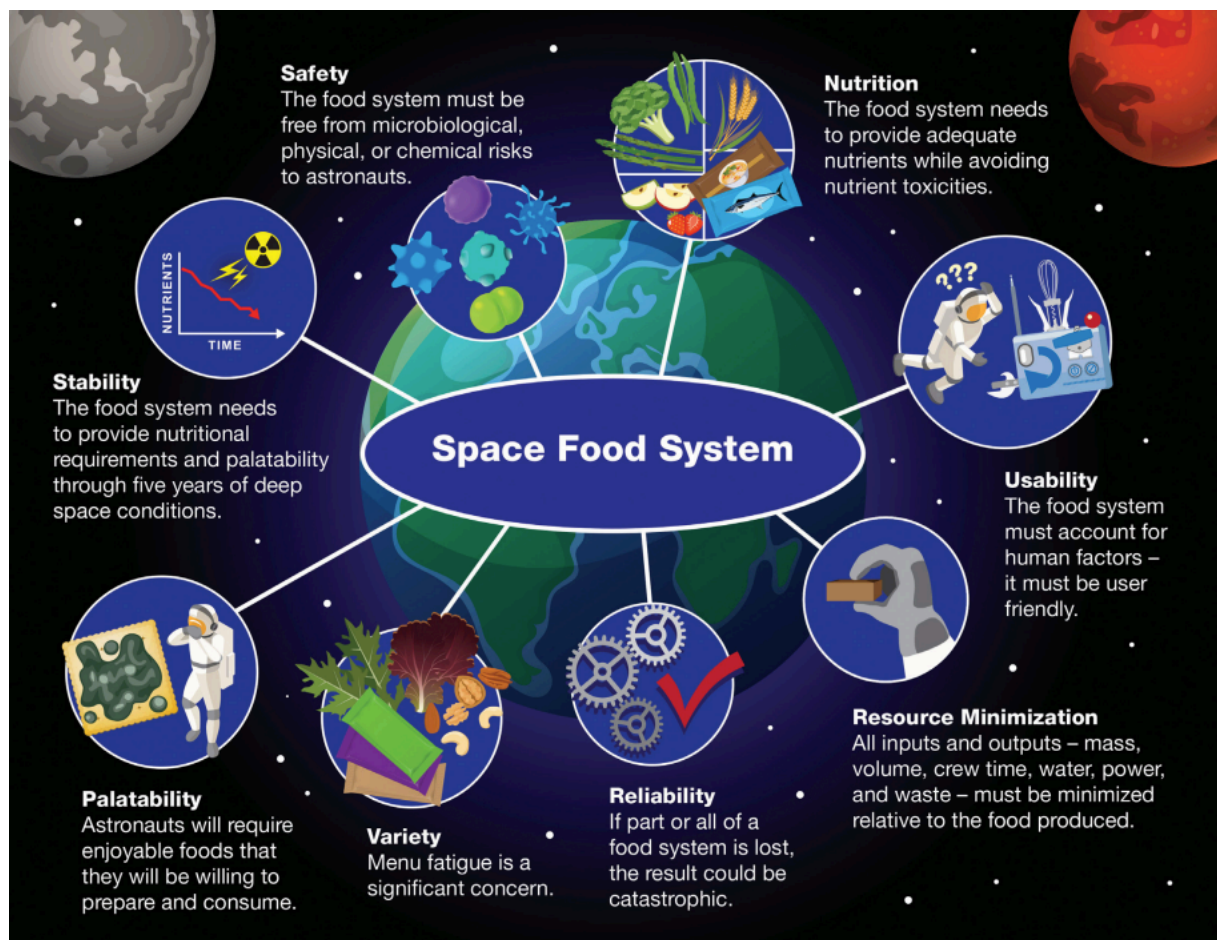


Figure 1 : les besoins que doit satisfaire le système alimentaire spatial (Douglas et al., 2020).

Actuellement, les aliments peuvent être classés en 5 groupes distincts (Watkins et al., 2022) :

- Les aliments sous leur forme naturelle, c'est-à-dire comme ils sont consommés sur Terre. Il s'agit de fruits et légumes frais, les différentes noix, des collations comme les m&m's etc (Jiang et al., 2020).
- Les aliments à faible teneur en eau comme les fruits séchés ; ils ont une activité d'eau réduite ce qui permet une bonne conservation et empêche le développement de micro-organismes (Naman Shafiee, 2017; Jiang et al., 2020).
- Les aliments thermostables : ils sont chauffés afin d'éliminer tous les microorganismes présents dans l'emballage. Ce sont essentiellement des sachets autoclavés ou des conserves de repas ou desserts déjà préparés (Naman Shafiee, 2017; Jiang et al., 2020).
- Les aliments déshydratés : Ils sont couramment utilisés car ils sont faciles à stocker et à transporter, et peuvent être réhydratés facilement grâce à l'eau disponible dans l'ISS. Ils sont produits par déshydratation à l'air ou par lyophilisation, et incluent des boissons comme le café et le thé, ainsi que des aliments solides tels que les fruits (Jayas, 2016; Jiang et al., 2020).
- Les aliments irradiés : ceux-ci sont soumis à une stérilisation par ionisation afin d'éliminer les bactéries, spores et autres organismes nuisibles. Cette méthode de conservation des aliments utilise des rayons gamma, des rayons X et des électrons de haute énergie, et peut être utilisée sur des aliments surgelés et préemballés (Naman Shafiee, 2017; Jiang et al., 2020; Moreira et al., 2021).

Durant la journée chargée d'un astronaute, 3 repas sont organisés : le petit-déjeuner, le dîner et le souper. Des collations sont à disposition durant la journée. Ces repas sont soigneusement planifiés pour fournir aux astronautes les nutriments nécessaires à leur santé et à leur bien-être pendant leur séjour dans l'espace. (Coisne et al., 2008).

2. LES ALIMENTS ET LES DESSERTS DANS L'ESPACE

La station spatiale est un milieu très restreint et très encombré avec des câbles, du matériel et des objets divers de tous les côtés (Figure 2)⁴ ; la cuisine se trouve dans le compartiment Node 1.



Figure 2 : Thomas Pesquet dans l'ISS (Source : RTL.fr)

L'apesanteur pose de nombreuses contraintes, et avant même de penser à l'emballage, il est nécessaire de penser à l'aliment lui-même. Le pain, les biscuits, les gâteaux... ces différents produits sont friables et lorsqu'ils sont consommés des miettes se forment et se répandent dans la station. Sur Terre, celles-ci tombent sur le sol et sont nettoyées, dans l'espace, elles se coincent derrière les panneaux, s'encombre à divers endroits et abîment le matériel ; d'un point de vue hygiénique ce n'est pas optimal.

Les astronautes manipulent très peu les aliments et ne les combinent que très rarement car cela est plus compliqué que sur Terre. Ils ne désirent pas salir ni nettoyer tout le compartiment. Il est donc nécessaire de limiter les manipulations, les déchets et l'espace utilisé.

⁴ Thomas Pesquet en direct depuis l'ISS : "C'est de la science-fiction" – Article journalistique d'une interview de Thomas Pesquet | Benjamin Hue. 23/11/2016. RTL. Consulté le 4 janvier 2023, <https://www.rtl.fr/actu/sciences-tech/en-direct-suivez-la-premiere-conference-de-presse-de-thomas-pesquet-depuis-l-iss-7785937365>

Pour éviter que les objets ne bougent, la quasi-totalité des ustensiles et emballages sont équipés d'un velcro ; des scratchs et attaches sont disposés sur la table de la cuisine et sur les parois un peu partout dans l'ISS afin de systématiquement avoir un moyen de fixer les objets. Des aimants sont également disposés sur certaines parois afin d'y coller des objets métalliques comme des ciseaux, couverts etc.

Pour ouvrir les emballages, les astronautes disposent de ciseaux, et de couverts pour manger. Ceux-ci



Figure 3 : Présentation de la cuisine de l'ISS par Thomas Pesquet (Source : LeHuffPost⁹)



sont nettoyés avec des lingettes désinfectantes, il n'y a pas de lave-vaisselle ou autre dans la station. Tout est donc fait à la main et les déchets sont conservés dans des sacs étanches pour ceux humides et dans un autre sac pour les secs. La gestion de l'hygiène et des déchets est extrêmement importante et doivent être optimisés.

Dans la Figure 3, Thomas Pesquet présente la cuisine avec à sa droite la table de la cuisine, de la nourriture, une étagère contenant différents produits alimentaires. A sa gauche se trouvent le distributeur d'eau, les frigos et armoires chauffantes. Là où se situe le caméraman sont disposés des stocks de nourriture pour les différents membres de l'équipage. L'endroit est restreint, de l'électronique se trouve partout autour. Il faut donc faire très attention à la manipulation des aliments et liquides^{5,6,7,8,9}.

Durant la pandémie de Covid-19, la consommation de desserts et sucreries a augmenté pour, entre autres, diminuer le stress et le mal-être des personnes plus impactées par le confinement et l'isolement (Costa et al., 2022). La station spatiale étant un endroit confiné, les desserts et sucreries peuvent être d'un réconfort non négligeable. Ce plat sucré rend les astronautes heureux, la plupart

⁵ 'Space makes eating a lot more fun!' Astronauts explain food prep – Explication de la cuisine de l'ISS par Jessica Meir et Andrew Morgan | Chaîne : VideoFromSpace. 16/04/2020. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, https://www.youtube.com/watch?v=onm7P_iFueE

⁶ Chris Hadfield's Space Kitchen – Explication de la cuisine de l'ISS par Chris Hadfield | Chaîne : Canadian Space Agency. 18/02/2013. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=AZx0RIV0wss>

⁷ Former NASA Astronaut Explains How Food Is Different in Space | WIRED – Explication de l'alimentation dans l'espace par Mike Massimino | Chaîne : WIRED. 16/07/2019. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=E36F4XG5zcy>

⁸ Cooking in space: whole red rice and turmeric chicken – Samantha Cristoforetti cuisine dans l'ISS | Chaîne : European Space Agency, ESA. 04/06/2015. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=4exaXdPKS3Y>

⁹ Thomas Pesquet fait visiter l'ISS avant son retour sur Terre – Visite de l'ISS par Thomas Pesquet | Chaîne : LeHuffPost. 06/11/2021. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, https://www.youtube.com/watch?v=gcmA0_CMFIU

sont des produits commercialisés. Certains sont simple comme les M&M's mais d'autres posent plus de contraintes comme les gâteaux ; Ils sont légers mais l'air qu'ils contiennent prend de la place (Bourland et al., 2010).

Les desserts consommés par les astronautes sont plutôt classiques : différents types de pudding, fruits au sirop, riz au lait, cake, mousse au chocolat... (Bourland et al., 2010) Il est même arrivé d'avoir de la glace dans l'ISS. Cependant elle a dû être consommée directement car il n'y a aucun congélateur dans la station. Cela a été réalisable car un congélateur d'échantillon vide y fut envoyé¹⁰.

Les desserts sont pour la plupart contenus dans des sachets autoclave et ont une conservation allant de 1,5 à 5 années (Jiang et al., 2020).

Dans les futurs projets spatiaux, cela pourrait être intéressant de disposer de congélateurs pour stocker de la nourriture fraîche. Le problème reste toujours le poids de l'eau qui augmente le coût des matières premières (Bychkov et al., 2021). Pour remédier au problème de poids, cultiver des aliments directement dans l'espace semble être des plus propice (Pandith et al., 2022).

3. BESOINS NUTRITIONNELS DE L'ASTRONAUTE

Le milieu spatial peut s'avérer délétère pour les fonctions vitales et les systèmes organiques de l'organisme humain. Il peut entraîner des effets néfastes sur les systèmes cardiovasculaire, neurologique et gastro-intestinal, ainsi que sur la dépense énergétique, la vision, la densité osseuse et la masse musculaire (Khoshvaghti, 2019). Ces types de changements sont illustrés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Systèmes du corps humain affectés lors des missions spatiales (Khoshvaghti, 2019)

Système du corps humain	Effets sur le système
Système musculaire	Perte musculaire, réduction de la force et du fonctionnement des membres inférieurs.
Système cardio-vasculaire	Variation de la forme du cœur, effet sur les fonctions cardiaques, rythme cardiaque irrégulier
Système immunitaire	Altérations de la forme des cytokines et des leucocytes périphériques
Système nerveux central	Variations dans les zones cérébrales sensorimotrices, cérébelleuses et vestibulaires
Système nerveux autonome	Stress orthostatique (accumulation veineuse)
Système osseux	Ostéoporose (perte osseuse)
Œil	Aplatissement du globe oculaire, œdème de la papille optique et nécrose de la couche des fibres nerveuses.
Système sanguin	Anémie, augmentation des globules rouges et des plaquettes

L'adoption d'une alimentation appropriée en milieu spatial peut contribuer au maintien des fonctions organiques, y compris les systèmes immunitaires, endocriniens et musculosquelettiques tout au long de la mission spatiale (Figure 4) (Leach et al., 1977; Bergouignan et al., 2016).

¹⁰ Ice cream for ISS : Frozen dessert flying on station-bound SpaceX Dragon – Article d'actualité spatial | 6/10/2012. collectSPACE. Consulté le 30 décembre 2022, <http://www.collectspace.com/news/news-100612a.html>

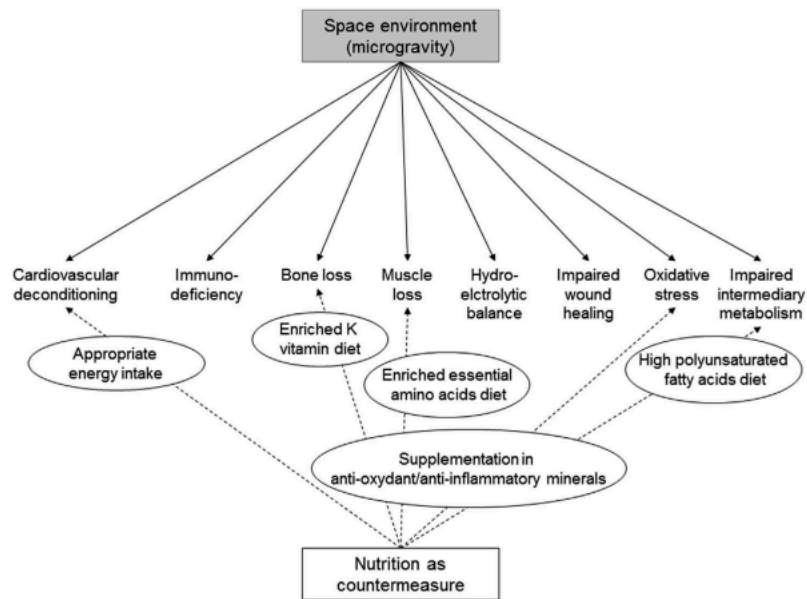


Figure 4 : Mesures visant à atténuer les adaptations métaboliques défavorables induites par l'apesanteur (Bergouignan et al., 2016).

Dans cette partie, des recherches sont effectuées afin de déterminer les besoins en nutriments des astronautes pendant les vols spatiaux de longue durée, notamment en minéraux et en vitamines, pour le maintien de la santé et la protection contre les effets de la microgravité et des radiations (Briguglio, 2021; Chaloulakou et al., 2022). Ces informations serviront de références directement résumées au point 3.1 Récapitulatif des besoins nutritionnels de l'astronaute à la page 9.

3.1. RÉCAPITULATIF DES BESOINS NUTRITIONNELS DE L'ASTRONAUTE

L'importance de l'alimentation pour les astronautes réside dans son impact direct sur leur santé et leurs performances. Tout d'abord, il est impératif de fournir une alimentation équilibrée et énergétique pour répondre aux besoins nutritionnels spécifiques des astronautes (Bychkov et al., 2021) et garantir l'apport calorique nécessaire à maintenir leur niveau d'énergie vital (Smith, 2009).

Cependant, face aux défis engendrés par la microgravité, les aliments doivent être rigoureusement élaborés pour prévenir la formation de miettes, afin d'éviter tout risque de contamination ou de danger. Les aliments déshydratés nécessitent une réhydratation adéquate pour garantir un apport nutritif suffisant. La variété des repas est cruciale pour les missions spatiales prolongées, afin d'éviter l'ennui alimentaire qui peut affecter le moral et le bien-être émotionnel des astronautes (Katayama et al., 2009). Ainsi, une sélection minutieuse d'une gamme diversifiée d'aliments s'avère essentielle pour maintenir l'intérêt et le bien-être mental de l'équipage. Au-delà des considérations physiologiques, les préférences individuelles en matière d'alimentation jouent un rôle primordial. Comme sur Terre, accorder une attention spéciale à ces préférences contribue à créer un environnement alimentaire plus plaisant et favorable.

Les données récoltées permettent de réaliser le Tableau 2 qui situe le produit de l'étude par rapport aux besoins nutritionnels de l'astronaute.

Tableau 2 : besoins nutritionnels de l'astronaute

Nutriments	Quantité journalière
Besoins énergétiques	Homme : 2900 ± 200 Kcal Femme : 2500 ± 200 Kcal
Protéines	12-15%
Lipides	30-35% → favoriser Oméga3 et AGPI.
Glucides	50-55%
Fibres alimentaires	21-25 g
Besoins hydriques	1-1,5ml / Kcal consommée
Calcium	1000-1200 mg
Phosphore	700 mg
Magnésium	Homme : 420 mg Femme : 320 mg
Sodium	1500-2300 mg
Chlore	2300-2000 mg
Potassium	4700 mg
Fer	8 à 10 mg Si menstruations +5 mg
Zinc	11 mg
Cuivre	0,5-9 mg
Sélénium	70 µg
Iode	150 µg
Manganèse	Homme : 2,3 mg Femme : 1,8 mg
Chrome	35 µg
Fluor	Homme : 4 mg Femme : 3 mg
Vitamine A	700-900 µg
Vitamine D	800 UI
Vitamine E	15 mg
Vitamine K	Homme : 120 µg Femme : 90 µg
Vitamine C	90 mg
Thiamine	Homme : 1,2 mg Femme : 1,1 mg
Riboflavine	1,3 mg
Niacine	16 mg d'équivalents niacine
Acide pantothénique	30 mg
Pyridoxine	1,7 mg
Biotine	30 µg
Acide folique	400 µg
Vitamine B12	2,4 µg
Antioxydants	Pas de données

3.2. BESOINS EN MACRONUTRIMENTS

Les macronutriments sont des nutriments qui sont nécessaires en grandes quantités dans l'alimentation humaine. Il s'agit des glucides, des protéines, des lipides et des fibres. Ils fournissent l'énergie nécessaire au corps pour fonctionner correctement et remplissent d'autres fonctions vitales.

3.2.1. BESOIN ÉNERGÉTIQUE

Le besoin énergétique correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir un poids corporel optimal ainsi qu'un niveau d'activité physique soutenable à long terme, ce qui contribue à la santé globale. Cette énergie doit être fournie par l'alimentation (EFSA et al., 2013). Les besoins varient en fonction du sexe, de l'âge, du poids, de la taille, de l'effet thermique des aliments et des activités quotidiennes (Figure 5) (von Loeffelholz et al., 2000). La gravité peut également avoir un impact ; sur Terre, celle-ci est constante ; cependant, dans l'espace, sur la lune ou sur mars, elle diffère (Oluwafemi et al., 2018). Dans ce travail, seul l'absence de gravité sera prise en compte. Les recommandations pour l'apport énergétique total (AET) de l'homme sont proches de 2900 ± 200 Kcal en fonction des sources, cependant la consommation est beaucoup plus variable allant de $2400 \text{ Kcal} \pm 600 \text{ Kcal}$ (Smith, 2009; Bychkov et al., 2021).

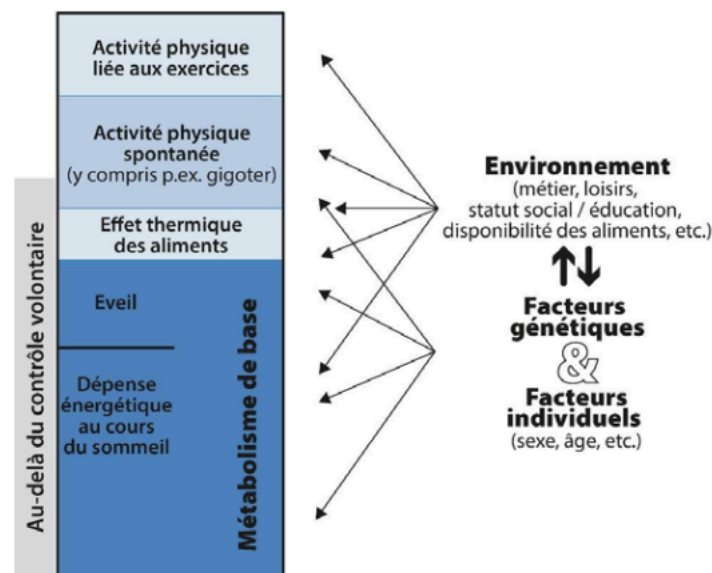


Figure 5 : schéma illustrant les compartiments de la dépense énergétique (von Loeffelholz et al., 2000)

Une formule plus précise pour les deux sexes permet de calculer le besoin en fonction de l'âge, de la taille et du poids (NASA JSC, 2005) :

$$AET = 622 - 9.53 \times \text{âge} [\text{années}] + 1.25 \times (15.9 \times \text{poids} [\text{kg}] + 539,6 \times \text{taille} [\text{m}])$$

Équation 1 : Calcul de l'AET pour les hommes âgés de 19 ans ou plus (NASA JSC, 2005)

$$AET = 354 - 6.91 \times \text{âge} [\text{années}] + 1.25 \times (9.36 \times \text{poids} [\text{kg}] + 726 \times \text{taille} [\text{m}])$$

Équation 2 : Calcul de l'AET pour les femmes âgées de 19 ans ou plus (NASA JSC, 2005)

3.2.2. PROTÉINES

Les protéines sont nécessaires pour le maintien des différents tissus et autres composés de l'organisme ; les besoins varient avec l'activité physique, la digestibilité et la qualité (CSS, 2016). Pour limiter la perte musculaire et osseuse, un apport en protéines adéquat accompagné de 2,5 heures d'activité physique par jour sont imposés aux astronautes (Hackney et al., 2015). L'apport en protéine recommandé est de 12 à 15% de l'AET dont 60% proviennent d'espèces animales car elles sont de haute valeur biologique (Smith, 2009). En revanche, un trop grand apport en protéine augmente la satiété et diminue l'apport calorique, ce qui risque d'exacerber la perte de poids (Bergouignan et al., 2016).

3.2.3. LIPIDES

Les lipides sont des composés carbonés ayant différents rôles dans le corps humain : énergétique, constitutionnel, absorption des vitamines liposolubles et maintien de certaines fonctions vitales (CSS, 2016). Il est recommandé de consommer 30 à 35% de l'AET sous forme de lipides dans l'espace (Smith, 2009). Il est également nécessaire de s'intéresser à la composition des lipides (acides gras saturés, monoinsaturés et polyinsaturés), surtout les oméga 3 car un apport supplémentaire a des effets positifs sur le métabolisme osseux (Zwart et al., 2010).

3.2.4. GLUCIDES

Les glucides se répartissent en différentes classes : les monosaccharides, les disaccharides, les oligosaccharides et les polysaccharides digestibles ; leur rôle est essentiellement énergétique (CSS, 2016). La recommandation de l'apport en glucide est de 50 à 55% de l'AET (Smith, 2009). L'apport favorise l'intolérance au glucose, pouvant augmenter le risque de troubles cardiovasculaires. Il serait intéressant de favoriser les glucides à faible index glycémique afin de limiter ces risques, cependant plus d'études à ce sujet sont nécessaires (Gao et al., 2020).

3.2.5. FIBRES ALIMENTAIRES

Les fibres alimentaires sont très variées au sens structurel ; elles ne sont ni digérées ni absorbées dans l'intestin grêle mais certaines peuvent être fermentées par la flore du gros intestin. Elles ont pour effet de favoriser le transit intestinal et de diminuer l'index glycémique des repas. (CSS, 2016). L'apport recommandé est de 10 à 25g de fibres par jour à bord de la station (Smith, 2009). Cependant il est plus intéressant d'en consommer au moins 21g (NASA JSC, 2005).

Les fibres fermentées par la flore intestinale entretiennent cette dernière, ce qui a pour effet de favoriser le bon fonctionnement des intestins (CSS, 2016). Elles sont également appelées prébiotiques. Voyager dans l'espace provoque des dérèglements de la flore intestinale à cause de la microgravité, des radiations et de l'alimentation qui est dépourvue de probiotique. Cela peut avoir un impact sur la santé des astronautes ; il est donc nécessaire de compléter l'alimentation en pré et probiotiques (Siddiqui et al., 2021; Al et al., 2022).

3.2.6. BESOINS HYDRIQUES

Dès les premières heures en milieu sans gravité, les fluides corporels dans le corps remontent de bas en haut pour s'équilibrer ; le volume sanguin et extracellulaire migrent augmentant le volume intracellulaire, ce qui a pour effet de rendre le visage boursoufflé (Oh et al., 1999). Ces changements aqueux

engendrent des variations de différents paramètres provoquant une augmentation du travail des reins et le risque de formation de caillots dans ceux-ci (Liakopoulos et al., 2012). Cependant le volume total d'eau du corps ne diffère pas de celui sur terre. Il est recommandé de consommer 1 à 1,5ml d'eau par kcal consommé (NASA JSC, 2005).

3.3. BESOINS EN MICRONUTRIMENTS

Pour faire face aux défis posés par l'espace, plusieurs micronutriments jouent un rôle crucial. Le calcium et la vitamine D, par exemple, sont essentiels pour maintenir la santé osseuse en prévenant la déminéralisation osseuse causée par le manque de gravité (Smith et al., 2012; Sibonga, 2013). Le fer est important pour renforcer la résistance aux radiations (Beard, 2006), tandis que des vitamines comme la B12 et la K sont nécessaires pour la fonction nerveuse et la coagulation sanguine (Olson, 1984). Les antioxydants comme les vitamines C et E protègent les cellules des dommages causés par le stress oxydatif, résultant notamment des radiations cosmiques (Sacheck et al., 2001; Johnson, 2006). Le zinc renforce le système immunitaire, crucial dans un contexte où les infections peuvent être problématiques (Palacios, 2006). Enfin, le sélénium agit comme un défenseur contre le stress oxydatif (Sunde, 2006). Les besoins ainsi que les quantités recommandées en micronutriments sont spécifiés en détail dans l'annexe 1 : Besoins en micronutriments de l'astronaute.

4. LES MICROALGUES

Les cyanobactéries (aussi connues sous le nom de "bactéries bleues") sont une classe de bactéries qui possèdent la capacité de photosynthèse. Elles sont appelées "bactéries bleues" en raison de la couleur bleue de leur pigmentation, due à la présence de chlorophylles et d'autres pigments photosynthétiques. Les cyanobactéries sont des organismes proches des plantes et sont considérées comme les premières formes de vie sur Terre à avoir produit de l'oxygène. Elles sont très importantes pour l'environnement et jouent un rôle clé dans le cycle de l'azote et de l'oxygène¹¹.

Les microalgues sont les matières premières innovantes de ce projet. Innovante mais point nouvelle ; Les premières consommations humaines remonteraient aux années 1520 à l'ancienne cité Tenochtitlan au Mexique (aujourd'hui appelée la ville de Mexico) où les populations locales cultivaient ces algues (Gohara-Beirigo et al., 2022). Dans l'union européenne, les microalgues destinées à la consommation sont considérées comme « Novel Food » (Règlement (UE) 2015/2283, 2015). Celle qui est plus particulièrement intéressante est la *Limnospira*, anciennement appelée *Arthrospira* ou de son nom commercial « spiruline » (Poughon et al., 2021).

4.1. PROCESSUS DE FABRICATION

Les microalgues peuvent être cultivées en système ouvert ou fermé ; le système ouvert possède de nombreux désavantages comme les contaminations élevées, une plus grande évaporation de l'eau, un produit de moins bonne qualité, une mauvaise optimisation du captage de la lumière pour la photosynthèse, moins de contrôle, une période d'élevage plus longue mais les capacités de production sont élevées et peu coûteuses (Chew et al., 2018). Cependant pour des raisons évidentes, ce type de procédé n'est pas envisageable dans l'espace. Il s'agit toutefois de ce qui fut à l'origine des cultures de

¹¹ Cyanobactéries et cyanotoxines dans l'eau potable et l'eau récréative– Définition et description des cyanobactéries | Pierre Chevalier et al. 29/04/19. Institut national de santé publique du Québec. Consulté le 3 janvier 2023, <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/cyanobacteries>

microalgues et cela a permis l'évolution vers le milieu fermé ; de nombreux systèmes ont été développés depuis (Klinthong et al., 2015). Le système de production des microalgues en milieu fermé est représenté en Figure 7.

Plusieurs paramètres rentrent en jeu pour produire des microalgues en photobioréacteur : la température, le pH, les nutriments disponibles, la taille du réacteur, la densité du milieu, l'apport en CO₂ et surtout l'exposition à la lumière. Un contrôle adéquat de ces paramètres permettra d'avoir une spiruline neutre en goût, de meilleure qualité et facile à consommer ; à contrario, la spiruline cultivée en milieu ouvert sera plus odorante avec des odeurs de poissons (Figure 6) (Ma et al., 2019).

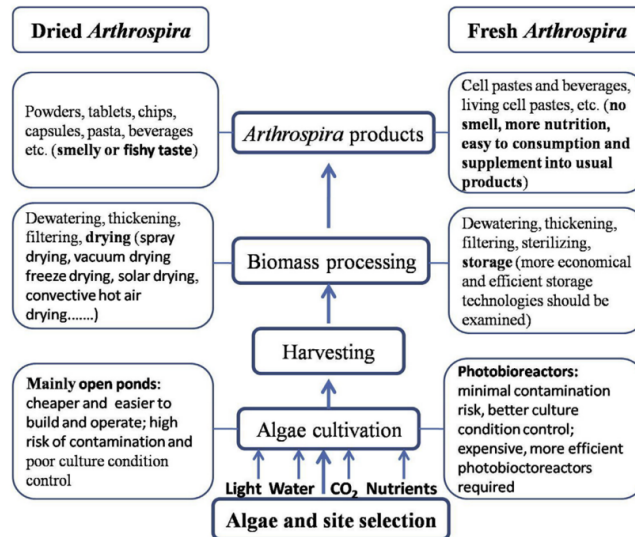


Figure 6 : Comparaison entre la production d'arthrospira fraîche et sèche (Ma et al., 2019).

Poughon et al. (2021) ont réalisé un projet pilote de photobioréacteur expérimental de 80 litres par la méthode *airlift*. Ils ont également réalisé un modèle de 50 ml pour le tester en condition spatiale et récupérer des données importantes pour la modélisation du système. Un photobioréacteur de type airlift utilise un dispositif de circulation d'air pour cultiver les microalgues. Il est généralement formé d'une colonne cylindrique ou tubulaire verticale dans laquelle un flux de gaz est injecté en bas de la colonne. Cette configuration permet une circulation efficace de la culture d'algues et une bonne rétention de pression, mais peut entraîner des limites en termes de productivité en raison de la faible surface spécifique éclairée et de l'orientation verticale qui n'est pas optimale pour capturer le flux solaire (Pruvost et al., 2017).

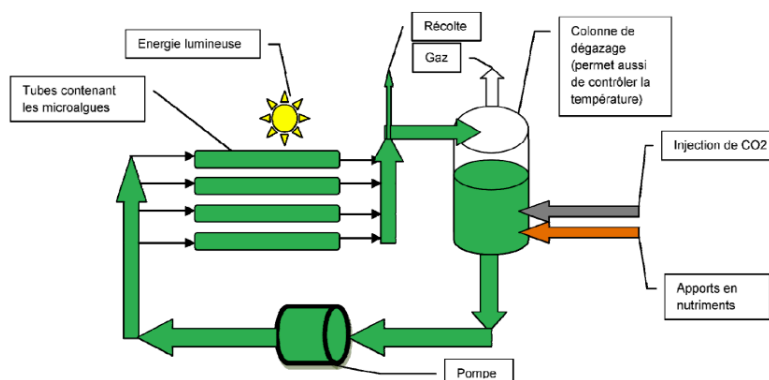


Figure 7 : système de production des microalgues en milieu fermé(Wahby, 2016)

4.2. COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES

Les microalgues sont particulièrement intéressantes pour leur teneur en protéines ; plusieurs sources existent avec des compositions différentes (Becker, 2007) mais elles sont également intéressantes pour leur teneur en vitamines et minéraux (Markou et al., 2014; Revellame et al., 2021).

Certaines espèces telles que la *Nannocloropsis* sp. et la *Chlorella* sp. sont également sources d'oméga-3 à longues chaînes, acides gras essentiels pour l'humain (Castro et al., 2020). cependant la consommation humaine ne permet pas un apport suffisamment élevé pour couvrir les besoins, il est donc nécessaire de les extraire et de les concentrer pour avoir une quantité intéressante assimilable (Adarme-Vega et al., 2012) ; cela reste envisageable dans l'espace mais ne semble pas être une priorité pour ce projet.

Les microalgues contiennent des antioxydants : lutéine, zéaxanthine, vitamine C, bêta-carotène, bêta-glucane, tocophérol, chlorophylle, composés phénoliques ... (Gohara-Beirigo et al., 2022).

De nombreuses études sont réalisées sur la consommation de spiruline en tant que complément alimentaire (Sotiroudis et al., 2013). La composition de la spiruline détaillée se trouve dans l'Annexe I. Les données sont exprimées en matière sèche, ce qui augmente grandement la quantité de nutriments et micro-nutriments par rapport à la denrée fraîche. De nombreux bienfaits sont attribués aux microalgues, la majorité sont exprimés dans le Tableau 3. Des études regroupent les bienfaits des spirulines : des propriétés anti-cancéreuse, diminution de l'anémie, propriétés neuroprotectrices, anti-inflammatoire ... (Girardin-Andréani, 2005; Anvar et al., 2021; Gohara-Beirigo et al., 2022).

Tableau 3 : composés bioactifs principaux des microalgues et leurs fonctions sur le corps (Gohara-Beirigo et al., 2022)

Composé bioactif	Propriétés fonctionnelles
Biopeptides	Réduits les risques de maladies cardiovasculaires, le stress oxydatif et l'hypertension.
EPA et DHA	Réduit les maladies cardiaques (hypertension artérielle, arythmie cardiaque, accident vasculaire cérébral), effet positif sur la dépression, l'asthme et la polyarthrite rhumatoïde, la santé mentale et anti-inflammatoire.
GLA	Méiateur du système immunitaire, préventif dans certaines maladies chroniques inflammatoires et cancers, intervient dans le métabolisme des lipides et glucides.
Polysaccharides sulfatés	Activité antivirale et inhibition de l'agrégation des leucocytes.
Vitamine C	Antioxydant.
Phycocyanine	Antioxydant, protection du foie, neuroprotecteur, anti-inflammatoire, antimicrobien, anti-allergique, limite l'hypertension, antitumorale et modulateur de l'immunité.
Chlorophylle	Antioxydant et antimutagène.
Composés phénoliques	Antioxydant, antiviral, anti-proliférateur, anti-inflammatoire, antimutagène, régulation de la digestion des macronutriments.

Composé bioactif	Propriétés fonctionnelles
Potassium	Régulation osmotique.
Magnésium	Participe au métabolisme des glucides et lipides, catalyseur de diverses enzymes, intervient dans la synthèse de certaines protéines, neurotransmetteur, participe à la contraction musculaire.
Phosphore	Rôle structural, phospholipides, coenzyme, nucléotide, ADN et ARN.
Calcium	Rôle structural dans le métabolisme osseux, cofacteur d'enzymes, intervient dans la coagulation sanguine, la fonction musculaire et nerveuse.
Fer	Transport de l'oxygène, formation de l'hémoglobine, cofacteur d'enzymes et rôle structural.
Zinc	Rôle dans la gestion du stress, la synthèse de protéines, intervient dans le système nerveux et certaines enzymes.

Ces données semblent présenter un aliment miracle. Toutefois, il faut garder à l'esprit que les concentrations varient en fonction des espèces et que la quantité généralement consommée comme complément alimentaire est concentrée : cela ne peut remplacer une alimentation saine et équilibrée. La spiruline reste un aliment intéressant et adapté pour la nutrition humaine.

Les méthodes de séchages et de cuissons telles que le micro-ondes et la cuisson thermique ont un impact négatif important sur la composition en vitamines liposolubles et hydrosolubles, la phycocyanine, les caroténoïdes, la chlorophylle ainsi que la couleur du produit (Nouri et al., 2018).

4.3. PROPRIÉTÉS / FONCTIONNALITÉS

Les microalgues ont différentes propriétés intéressantes telles que des propriétés moussantes, émulsifiantes, gélifiantes, ce qui permet de les incorporer dans les aliments de différentes manières et d'obtenir des produits variés (Fradique et al., 2010; Schwenzfeier et al., 2011; Ursu et al., 2014).

- Elles ont une capacité de coloration importante, généralement bien acceptée par le consommateur (Fradique et al., 2010).
- La solubilité des protéines est proche des 100% à pH entre 6 et 8,5 ; en dessous la solubilité diminue de moitié et continue à décroître (Schwenzfeier et al., 2011).

Leurs propriétés émulsifiantes sont particulièrement intéressantes au vu des excellents résultats des analyses avec une grande stabilité (Ursu et al., 2014).

4.4. PROJET MELISSA

La fondation MELISSA a pour objectif de préparer les prochaines missions habitées en améliorant leur autonomie ; le système permet la production d'oxygène, d'eau et de nourriture grâce à un processus de recyclage¹². MELISSA est inspiré d'écosystèmes aquatiques illustré dans la Figure 8; Le projet

¹² FAQ – Foires aux questions sur le projet MELISSA | N.D. MELISSA FOUNDATION. Consulté le 31 décembre 2022, <https://www.melissafoundation.org/page/faq>

comporte 5 boucles : recyclage des déchets organiques (1), photosynthèse anaérobie (2), nitrification et recyclage de l'eau (3), Photosynthèse : production alimentaire par micro-organismes et productions de végétaux consommables (4), compartiment de production (5)¹³. Le Tableau 4 reprend les différents compartiments et leurs utilisations.

Figure 8 : Schéma d'un écosystème sur lequel se base les différents modules du système MELISSA. (Source : ESA)

Tableau 4 : Rôles et utilisations des différents compartiment du projet MELISSA

Compartiment	Rôles ¹⁴	Utilisations pratiques
CI Compartiment de liquéfaction	Ce compartiment constitue un réservoir de collecte des déchets organiques (alimentaires, urine, papier, végétaux non alimentaire...). Sa fonction principale est de décomposer les déchets de manière anaérobie. Le	Différents travaux sont réalisés sur l'optimisation de la dégradation des déchets. Ceux-ci sont décomposés en ammonium, dioxyde de carbone, acides gras volatiles et minéraux. Il permet notamment la protéolyse, la saccharolyse et la cellulolyse

¹³ MELISSA : de la recherche spatiale utile sur terre – Article de présentation du système MELISSA | 06/09/2016. ESA. Consulté le 13/12/2022, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Belgium_-_Francais/MELISSA_de_la_recherche_spatiale_utile_sur_la_Terre

¹⁴ Closed Loop Compartments – Explication des différents cycles du système MELISSA | N.D. ESA. Consulté le 31/12/22, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Melissa/Closed_Loop_Compartments

Compartiment	Rôles ¹⁴	Utilisations pratiques
	CO ₂ produit alimente le CIV et les déchets dans le CII.	(Poughon et al., 2013; Zhang et al., 2018, 2019)
CII Compartiment photohétérotrophique	Le compartiment C2 a pour fonction d'éliminer les produits issus du C1 : Les acides gras volatiles et l'ammoniaque seront transformé en carbone inorganique.	Les recherches sur le compartiment sont autant utile dans l'espace que sur terre pour dépolluer certains milieux, notamment avec <i>Rhodospirillum rubrum</i> (Bayon-Vicente et al., 2020, 2021; Cabecas Segura et al., 2021, 2022; Verbeelen et al., 2021).
CIII Compartiment de nitrification	Celui-ci a pour objectif de convertir l'ammoniaque en nitrates, source principale d'azote pour les plantes du compartiment IVb.	La nitrification permet entre autres le recyclage des urines pour récupérer l'azote sous forme disponible pour les plantes. Elle peut également faire partie du recyclage des eaux usées (De Paepe et al., 2020; Lindeboom et al., 2020; Verbeelen et al., 2021; Mastroleo et al., 2022).
CIVa Compartiment photosynthétique des algues CIVb Compartiment photosynthétique des végétaux	Le compartiment C4 permet de recycler l'oxygène et sert de production alimentaire. Il est divisé en 2 : les algues et les végétaux ; le deuxième permet en plus de recycler l'eau par condensation Ce compartiment est encore en développement et compte 32 cultures étudiées.	Les microalgues recyclent le CO ₂ en O ₂ et apportent des protéines de haute valeur biologique. Les applications sur terres sont nombreuses et compliquées à transposer dans l'espace. Pour le moment l'effet de la gravité sur la croissance des plantes est surtout étudiée (Fahrion et al., 2021; Aronne et al., 2022; Garcia-Gragera et al., 2022; Izzo et al., 2022).
CV Compartiment de consommation	Ce compartiment est en développement et porte sur la consommation des aliments produits. Il comprend les passagers (humains et animaux).	La consommation d'algues par des rats est étudiée afin d'évaluer l'acceptabilité et l'intérêt de l'aliment (Tranquille et al., 1994; Alemany et al., 2019; Segers et al., 2022).

4.4.1. LES MICROALGUES DANS LE COMPARTIMENT C4A (PROJET MELISSA)

Le compartiment C4A a pour objectif d'exploiter le système photosynthétique car il aborde divers aspects pour produire de la nourriture et de l'oxygène (Janssen et al., 2014; Fahrion et al., 2021) ; les algues contenues dans les bioréacteurs sont alimentées par des éléments nutritifs à base d'azote (urée, ammonium et nitrite) (Coppens et al., 2016; Sachdeva et al., 2018).

L'ARTHROSPIRA PLATENSIS ET LA LIMNOSPIRA INDICA

Un des intérêts nutritionnels des microalgues est leur teneur élevée en protéine ; les cyanobactéries *Arthrospira platensis* et *Chlorella vulgaris* sont toutes les deux étudiées dans le cadre du projet

MELISSA. Leur teneur en protéines est similaire cependant la première possède une digestibilité et une qualité supérieure (Muys et al., 2019).

La *Limnospira* est communément appelée *Arthrospira* ou Spiruline. La souche utilisée dans le photobioréacteur du compartiment C4a est la *Limnospira indica* PCC 8005. Il s'agit d'une cyanobactérie photosynthétique Gram négatif (Lasseur et al., 2010; Nowicka-Krawczyk et al., 2019; Poughon et al., 2021). La *Limnospira indica* a montré son efficacité en cohésion avec le compartiment C5 en fournissant de l'oxygène et de la nourriture à des rats. Sa production d'O₂ ne varie pas avec la microgravité (Alemany et al., 2019; Poughon et al., 2020).

4.4.2. ALISSE (ADVANCED LIFE SUPPORT SYSTEM EVALUATOR)

Dans le cadre de ce projet, MELISSA a mis en place l'ALISSE (Advanced Life Support System Evaluator), qui est un ensemble de critères et de normes qui vise à évaluer et à optimiser les performances des systèmes de support de vie en milieu clos.

Les critères ALISSE sont conçus pour mesurer différents aspects des systèmes de support de vie écologique, notamment leur efficacité en termes de consommation d'énergie, de production alimentaire, de gestion des déchets, de recyclage des ressources, de qualité de l'air et de l'eau, et bien d'autres. Ces critères sont basés sur des principes de durabilité, d'efficacité et de fiabilité, afin de garantir que les systèmes de support de vie peuvent maintenir un équilibre écologique et soutenir la vie humaine sur de longues périodes (Brunet et al., 2010).

II. LES DIFFÉRENTS TYPES DE CUISSON

1. LA CUISSON THERMIQUE

La cuisson est une opération qui consiste à chauffer un produit à une certaine température pendant un certain temps et dans un environnement bien défini (Bimbenet et al., 2002). Par ailleurs, elle transforme l'aliment de façon irréversible en en modifiant la quantité, l'aspect, la couleur, le goût, la texture pour le rendre assimilable, nourrissant ou plus savoureux (Barham, 2001).

1.1. TECHNIQUE DE LA CUISSON THERMIQUE

La cuisson thermique est une méthode fondamentale de préparation des aliments qui peut être explorée sous deux approches principales : la cuisson volumétrique et le transfert de chaleur (Broyart, 1998).

La cuisson volumétrique se concentre sur la manière dont la chaleur pénètre à l'intérieur d'un aliment, garantissant ainsi une cuisson uniforme sur toute sa masse (Gavahian et al., 2019). Cette approche vise à s'assurer que la chaleur atteint chaque partie de l'aliment de manière égale, évitant ainsi les inégalités de cuisson (Maloney et al., 2016). Les techniques de chauffage volumétrique typiques utilisées dans les industries alimentaires comprennent le chauffage par micro-ondes, radiofréquence et ohmique. Le point commun à ces méthodes de chauffage volumétrique est le fait qu'elles ne nécessitent pas de surfaces chaudes ou reposent sur un transfert de chaleur par conduction ou convection à travers un produit (Maloney et al., 2016; Gavahian et al., 2019).

D'autre part, le transfert de chaleur implique les mécanismes par lesquels la chaleur est déplacée d'une source de chaleur vers l'aliment. Il comprend deux modes principaux (Broyart, 1998) :

- Conduction : La chaleur se propage à travers un matériau solide, comme lorsque la chaleur est transférée d'une poêle chaude à un aliment en contact.
- Convection : Ce mode de transfert de chaleur a lieu dans les liquides et les gaz. La chaleur est transmise par le mouvement des particules chauffées qui se déplacent vers des zones plus froides, créant ainsi un mouvement de chaleur.

1.2. RÔLE DE LA CUISSON SUR LES ALIMENTS

La cuisson remplit un éventail de fonctions variées, lesquelles sont déterminées par la nature de l'aliment et la méthode de cuisson appliquée. Cependant, ces fonctions peuvent être classifiées en trois catégories principales : nutritionnelle, organoleptique et sanitaire.

RÔLE NUTRITIONNEL :

La cuisson a pour premier objectif d'améliorer la digestibilité des aliments, en particulier ceux qui sont riches en amidon ou en fibres comme les céréales et les légumineuses. Les céréales telles que le riz, le blé et le maïs, largement consommées à l'échelle mondiale (Lerat, 1968; Pomeranz, 1988), contiennent principalement de l'amidon. Sous l'effet de la chaleur, cet amidon, généralement structuré en grains, subit une dextrinisation. Les molécules ainsi formées deviennent plus digestibles et apportent une saveur agréable aux préparations, y compris les biscuits. En outre, la cuisson contribue à atténuer l'impact des facteurs antinutritionnels qui limitent l'absorption des nutriments (Rehman et al., 2005). Toutefois, malgré l'avantage majeur de la cuisson dans la prévention des risques liés à la consommation d'aliments crus (Wrangham et al., 2003), il est incontestable qu'elle entraîne une réduction évidente de certaines propriétés nutritionnelles des aliments. Cependant, des éléments tels

que les vitamines et les minéraux se révèlent fragiles et malheureusement peu résistants à la chaleur. Toute augmentation de température entraîne des conséquences néfastes, car elle accélère d'une part les réactions chimiques, notamment l'oxydation des vitamines, et d'autre part les transferts de matière, comme les diffusions d'éléments dans l'environnement de cuisson (Benterud, 1977).

RÔLE SANITAIRE :

Les aliments crus, tels que la poudre d'œufs, la poudre de lait ou la farine, présentent un risque de contamination, que ce soit par des micro-organismes ou par des toxines. La cuisson, grâce à l'effet de la chaleur, joue souvent un rôle crucial dans l'amélioration de la salubrité des aliments. Elle entraîne la destruction partielle ou totale de la flore thermosensible (Dupin et al., 1992), et elle contribue également à éliminer de nombreuses toxines. À titre d'exemple, l'étude de Hwang et Lee (2006) a démontré que la cuisson réduit considérablement la concentration en aflatoxine B1 dans le blé.

RÔLE ORGANOLEPTIQUE :

Les caractéristiques sensorielles des aliments se regroupent en trois catégories : l'apparence, la saveur et la texture. Cependant, la cuisson a un large éventail d'effets sur ces qualités sensorielles :

- Les changements d'apparence touchent les aspects visuels tels que la couleur, la taille et la forme de l'aliment.
- Les modifications de la saveur concernent le goût et l'odeur de l'aliment.
- Les transformations de la texture sont liées aux sensations tactiles, bien que la vue et l'ouïe puissent également contribuer à la perception de la texture.

1.3. LA CUISSON THERMIQUE DANS LE MILIEU SPATIAL

La cuisson thermique dans le milieu spatial nécessite l'adaptation de techniques de cuisson traditionnelles pour répondre aux contraintes uniques de l'environnement spatial. L'absence de gravité a un impact sur les processus de cuisson traditionnels tels que la conduction et la convection. Les aliments ne se comportent pas de la même manière qu'ils le feraient sur Terre, ce qui nécessite l'adaptation des méthodes de cuisson. De plus, les ressources comme l'énergie et l'eau sont rares dans l'espace, ce qui exige des technologies de cuisson économes en ressources.

Les méthodes de cuisson dans l'espace incluent le réchauffement par micro-ondes, la réhydratation des aliments déshydratés, l'utilisation de fours spéciaux et l'emploi d'aliments prêts à l'emploi. Ces approches garantissent une distribution uniforme de la chaleur malgré l'absence de gravité, préservent les qualités gustatives et nutritives, et permettent une cuisson précise en microgravité.

Comme évoqué précédemment, les méthodes de cuisson actuellement disponibles incluent la cuisson au micro-ondes et la cuisson ohmique. Chacune de ces méthodes propose une approche distincte pour la préparation des aliments, avec ses avantages spécifiques.

2. LA CUISSON MICRO-ONDES

La cuisson est un processus complexe qui implique une série de modifications physiques, chimiques et biochimiques d'un produit (Sablani et al., 1998). Il existe de nombreuses techniques de cuisson utilisant différentes technologies pour aboutir à ces transformations, à savoir la cuisson par micro-ondes appelées aussi ondes électromagnétiques. L'utilisation de la technologie des micro-ondes a gagné l'acceptation dans l'industrie alimentaire pour plusieurs types de procédés tels que le séchage, le blanchiment, la cuisson, la décongélation, la pasteurisation, la stérilisation, le chauffage et la fonte des graisses (Datta et al., 2001; Şakıyan et al., 2011). Ils sont également largement utilisés dans la vie de

tous les jours pour le chauffage rapide des aliments, notamment pour les aliments dits « prêts à l'emploi » (Chizoba Ekezie et al., 2017).

2.1. TECHNIQUE DE LA CUISSON MICRO-ONDES

La cuisson aux micro-ondes résulte de la capacité des produits à absorber l'énergie des micro-ondes et à la convertir en chaleur (Curet, 2019; Franco et al., 2021).

Les micro-ondes provoquent un mouvement moléculaire par la migration de particules ioniques ou la rotation de particules dipolaires (Figure 9). La conduction ionique a recours à la migration oscillatoire des ions sous l'action d'un champ électrique à haute fréquence (Datta et al., 2000), tandis que la rotation dipolaire fait référence à l'alignement de molécules polarisées. L'eau est généralement la composante polaire majeure des produits alimentaires (Vadivambal et al., 2010; Meda et al.). Ces mouvements entraînent des collisions entre les ions et d'autres molécules, entraînant la conversion de l'énergie cinétique des ions en énergie thermique (Salazar-González et al., 2012; Musto et al., 2014).

De même, Mello et al. (2014) ont déclaré que la polarisation dipolaire est le principal effet de chauffage. Le chauffage se produira principalement en raison des pertes par frottement lorsque les molécules tentent de se réaligner avec le champ. Par conséquent, la quantité d'eau et d'ions dissous sont les principaux déterminants affectant la vitesse de cuisson aux micro-ondes (Ohlsson et al., 2001). Comme l'eau est le principal absorbeur d'énergie des micro-ondes dans les aliments, par conséquent, plus la teneur en humidité des aliments est élevée, plus la cuisson est rapide.

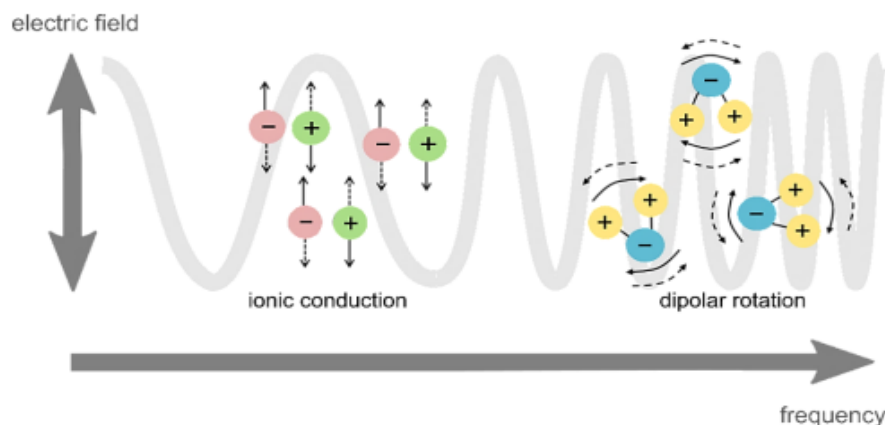


Figure 9 : Représentation schématique des deux principaux mécanismes liés au chauffage par micro-ondes : la rotation dipolaire et la conduction ionique (Curet, 2019).

2.2. RÔLE DE LA CUISSON MICRO-ONDES SUR LES ALIMENTS

La technique de cuisson par micro-ondes est utilisée dans de nombreuses applications dans l'industrie alimentaire, grâce aux nombreux avantages qu'elle présente. Pour certains produits, l'application d'une cuisson aux micro-ondes a permis un gain de temps et l'obtention de produits finaux d'une qualité supérieure (plus de goût, de couleur et de valeur nutritionnelle) et cela grâce à une génération de chaleur rapide (Dahmoune et al., 2015). De plus, il a également été rapporté que cette technique réduisait le temps de traitement l'évaporation ayant lieu plus rapidement, augmentait l'efficacité énergétique (Švarc-Gajić et al., 2013) et permettait une meilleure stabilité des nutriments et/ou des propriétés organoleptiques (Łechtańska et al., 2015).

Lors de la cuisson par micro-ondes, qui comme la cuisson ohmique est une cuisson volumique, la chaleur est produite à l'intérieur de l'aliment (Suarez et al., 2000), alors qu'avec un four conventionnel, la chaleur est perdue lorsque l'air chaud à l'intérieur du four s'échappe à l'extérieur. De ce fait, la cuisson aux micro-ondes est plus efficace que la cuisson classique, car on a moins de perte d'énergie, ce qui permet d'économiser au moins 20% de l'énergie (Hill et al., 1998). En outre, le rendement global d'un système de micro-ondes est très élevé à cause de l'efficacité des magnétrons à haute puissance (85% à 900 MHz, 80% à 2450 MHz) (Metaxas et al., 1983).

De plus, la cuisson au four à micro-ondes est une cuisson bien particulière qui a un impact sur les aliments plus ou moins avantageux. En ce qui concerne les propriétés organoleptiques des aliments, la cuisson aux micro-ondes change l'aspect des aliments en préservant la saveur, les caractéristiques sensorielles, et la couleur des aliments grâce à une génération de chaleur rapide (Ahmed et al., 2007; Dahmoune et al., 2015).

En revanche, elle permet aussi la réduction de la dégradation thermique des nutriments essentiels et l'augmentation de la rétention des facteurs de qualité alimentaire (Suarez et al., 2000).

A propos des protéines, les vitesses de dégradation dépendent du temps de cuisson et de la température. Petrucelli et al. (1994) ont démontré qu'il n'y a pas de différence significative sur la valeur nutritionnelle des protéines dans des aliments traités par chauffage classique et micro-ondes.

De même, l'effet des micro-ondes sur la stabilité des lipides a également été étudié. Diverses études ont été conduites sur la stabilité des lipides lors de la cuisson aux micro-ondes dans différents aliments, y compris dans le soja, le jaune d'œuf et la viande, etc. (Hill et al., 1998). Les résultats ont montré que la cuisson par micro-ondes n'induit pas plus de modifications chimiques dans les graisses que les méthodes de cuisson conventionnelles, donc elle ne génère pas de radicaux libres car elle n'entraîne pas plus d'oxydation des lipides (Hill et al., 1998).

D'autre part, de nombreuses études ont été menées pour déterminer la stabilité des vitamines dans les aliments cuits au micro-ondes par rapport à celles des aliments cuits de manière conventionnelle (Decareau, 1992). La rétention des vitamines liposolubles et hydrosolubles varie en fonction du temps de cuisson, de la température interne, du type de produit et de la puissance du four. Par conséquent, la rétention des vitamines dans les aliments chauffés aux micro-ondes est meilleure que celle des aliments préparés de manière classique en raison du temps de chauffage plus court (Decareau, 1992). Ceci est en concordance avec l'étude effectuée par le groupe d'experts sur la sécurité alimentaire et la nutrition de l'Institute of Food Technologists, qui a conclu que la rétention de vitamines dans les aliments cuits au micro-ondes est améliorée parce que le temps de cuisson est raccourci.

En conclusion, les aliments cuits plus rapidement pendant une durée plus courte à des niveaux d'énergie plus élevés, conservent de plus grandes quantités de nutriments thermolabiles que les aliments chauffés par d'autres méthodes

L'inconvénient majeur reconnu dans le chauffage par le four à micro-ondes est la distribution non uniforme de la température dans les aliments (Vadivambal et al., 2010). Cette distribution non uniforme a été observée principalement dans les aliments solides (Manickavasagan et al., 2006). Cependant, le chauffage par micro-ondes est adapté pour les aliments liquides dans les systèmes continus, mais d'autres inconvénients et risques peuvent avoir lieu.

2.3. LE FOUR MICRO-ONDES DANS LE MILIEU SPATIAL

Les micro-ondes sont utilisés dans la ISS pour réchauffer les aliments destinés à la consommation des astronautes. Cependant, les micro-ondes traditionnels ne peuvent pas être utilisés de la même manière que sur Terre en raison de l'absence de gravité et des préoccupations liées à la sécurité.

Les micro-ondes classiques utilisent la rotation du plateau tournant pour distribuer uniformément la chaleur dans les aliments. Cependant, en microgravité, ce mécanisme ne fonctionne pas comme prévu. Pour contourner ce problème, des micro-ondes spécialement conçus pour l'espace ont été développés. Ils utilisent des méthodes de distribution de chaleur différentes pour s'assurer que les aliments sont chauffés de manière uniforme et en toute sécurité.

L'utilisation des micro-ondes dans l'espace permet aux astronautes de réchauffer rapidement et efficacement leurs repas sans avoir à utiliser des méthodes de cuisson traditionnelles qui nécessitent plus de ressources en énergie et en temps

3. LA CUISSON OHMIQUE

Au cours des dernières années, de nombreuses recherches ont été menées sur les applications du chauffage ohmique dans la transformation de différents types d'aliments (Dornoush et al., 2022; Long et al., 2022). Le principe de base du chauffage ohmique repose sur la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique à l'intérieur d'un conducteur. Généralement, un courant alternatif est appliqué au matériau. Étant donné que le chauffage se produit par génération interne d'énergie dans le conducteur, cette méthode aboutit à une répartition remarquablement uniforme des températures à l'intérieur du matériau. De plus, elle ne dépend pas des mécanismes de transfert de chaleur, ce qui signifie que l'absence de convection n'est pas un handicap.

Étant donné que l'énergie est presque entièrement dissipée à l'intérieur du matériau chauffé, il n'est pas nécessaire de chauffer les parois d'échange de chaleur intermédiaires - ainsi, le processus présente une efficacité de transfert d'énergie proche de 100% (Salengke, 2000). Cela devrait être bénéfique en termes de Masse Système Équivalente (MSE) (Levri et al., 2003).

3.1. TECHNIQUES DE LA CUISSON OHMIQUE

Le chauffage ohmique, également connu sous le nom d'effet Joule, est un processus de chauffage basé sur le passage d'un courant électrique à travers un matériau (Gally et al., 2016). Le matériau, utilisé comme une résistance électrique, est, dans cette étude, une matrice alimentaire. La conductivité électrique du matériau, qui mesure la capacité d'une solution ou d'un matériau à conduire un courant électrique, est donc un paramètre essentiel dans la cuisson ohmique (Gavahian et al., 2019). Elle dépend de la nature des ions (charge, taille et mobilité) et du matériau (constante diélectrique, viscosité...), et varie avec de nombreux paramètres (champ électrique, fréquence...). La conductivité électrique du matériau à chauffer doit être suffisante. La conductivité électrique idéale pour l'utilisation du chauffage ohmique se situe entre 0,01 S/m et 10 S/m (Ramaswamy, n.d.). En dessous de cette valeur, la tension requise sera trop importante pour générer de la chaleur, et au-dessus, le courant requis sera trop important (Piette et al., 2004). La conductivité électrique des produits alimentaires varie entre 10^{-3} S/m et 10^{-2} S/m. En général, les produits solides sont moins conducteurs que les produits liquides (Icier, 2012). Le Tableau 5 à la page 28 est un tableau des conductivités électriques des produits alimentaires (Maloney et al., 2016).

Le chauffage ohmique est une technique de chauffage volumétrique, c'est-à-dire une technique qui chauffe l'ensemble du volume d'un matériau. Les technologies de chauffage volumétrique utilisées dans l'industrie alimentaire comprennent le micro-ondes, la radiofréquence et le chauffage ohmique (Maloney et al., 2016; Gavahian et al., 2019). Comparées à celles-ci, les méthodes de chauffage conventionnelles sont des techniques de chauffage de surface. Dans ces cas, la chaleur est transférée au matériau traité à partir d'une surface chauffée (par conduction ou convection). La température de la surface chauffée est donc plus élevée que celle du matériau à chauffer, ce qui peut entraîner des dommages thermiques à la surface. Cela sera évité dans la cuisson volumétrique, qui ne nécessite pas de surfaces chaudes et ne dépend pas du transfert de chaleur par conduction ou convection à travers le produit (Maloney et al., 2016; Gavahian et al., 2019).

Comme indiqué précédemment, le principe derrière la technologie de chauffage ohmique est l'effet Joule. Cet effet se produit lorsqu'un courant électrique traverse le produit alimentaire à chauffer ou à cuire, entraînant une augmentation de la température due à la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique (Sakr et al., 2014). Ainsi, le chauffage ohmique est une technologie qui consiste à chauffer les aliments en faisant passer un courant électrique à travers eux. La chaleur est donc générée internement dans le produit (en raison de la propre résistance thermique de la matrice alimentaire). Le produit alimentaire est en contact direct avec les électrodes (Kaur et al., 2016).

L'efficacité et la rapidité de cette technique (haute température pour une courte durée de traitement) permettent de préserver les caractéristiques inhérentes du produit telles que sa couleur, son goût et sa texture. Le chauffage ohmique peut être appliqué à tout produit conducteur et pompable (Maloney et al., 2016).

La figure suivante représente le schéma d'un dispositif de chauffage ohmique (Gavahian et al., 2019).

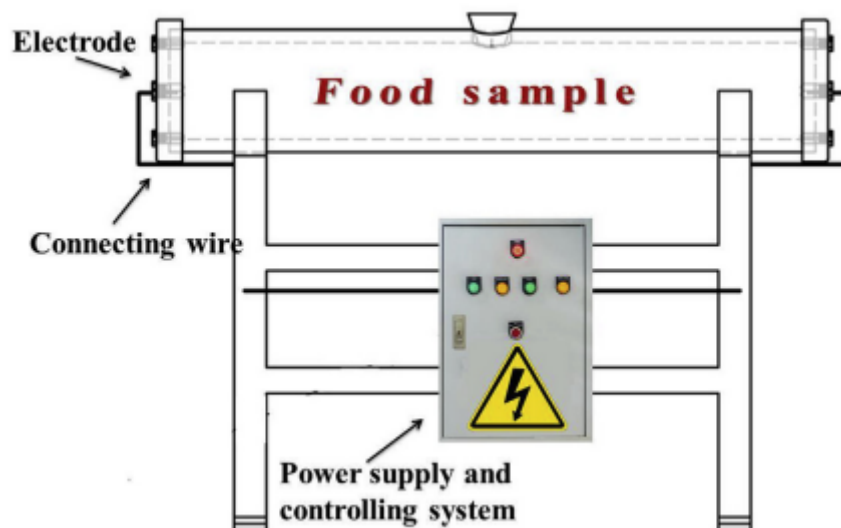


Figure 10 : Schéma représentatif d'un four ohmique pour la cuisson d'aliments (Gavahian et al., 2019).

L'énergie électrique est transmise à travers deux électrodes qui sont en contact direct avec le produit à chauffer (Gavahian et al., 2019).

Le taux de chauffage du produit est déterminé par (Gavahian et al., 2019) :

- ⇒ La tension et la fréquence du courant électrique ;
- ⇒ La surface de contact entre les électrodes et l'aliment ;

- ⇒ La distance entre les deux électrodes ;
- ⇒ La conductivité de l'aliment, déterminée par sa composition chimique, son état physique et sa température ;
- ⇒ Les changements d'état physique de l'aliment (par exemple, dénaturation des protéines ou évaporation de l'eau) ;
- ⇒ Le débit du matériau dans le cas du chauffage ohmique continu.

De plus, dans le chauffage ohmique, les processus électrochimiques aux interfaces électrode/solution doivent être évités ou réduits au minimum. La sécurité serait clairement la considération principale tout au long de la durée de la mission. Il a été constaté que les courants alternatifs à haute fréquence, permettant une charge minimale des doubles couches électriques, inhibaient considérablement la réaction électrochimique (Amatore et al., 1998; Wu et al., 1998). Samaranayake (2005) a observé que le chauffage ohmique pulsé pouvait réduire significativement la réaction électrochimique à la surface des électrodes, par rapport au chauffage ohmique sinusoïdal classique à 60 Hz. On s'attend donc à ce que le chauffage ohmique pulsé avec une fréquence élevée et un long temps de retard entre les impulsions évite efficacement le pire scénario, tel que la production de gaz électrolytique. Le chauffage ohmique ne convient pas à la cuisson de produits gras et peut entraîner une dégradation de certains micronutriments. Cependant, il présente d'autres avantages tels qu'un temps de cuisson plus court, une économie d'énergie, une répartition uniforme de la chaleur et l'absence de préchauffage (Dornoush et al., 2022).

3.2. AVANTAGES DE LA CUISSON OHMIQUE

La technologie de cuisson ohmique présente de nombreux avantages particulièrement pertinents dans le contexte des conditions spatiales. Les avantages sont les suivants :

- L'augmentation de la température se produit très rapidement (Sakr et al., 2014) : plus de 1°C par seconde (Fellows, 2016).
- Le chauffage est homogène : les particules du produit sont chauffées par le champ électrique (Bozkurt et al., 2010; Sakr et al., 2014).
- Le processus de chauffage ne dépend pas de la convection, qui peut être fortement impactée par la microgravité.
- Comme le temps de traitement est réduit, cela permet de maintenir de meilleurs niveaux de composés nutritionnels (les composés nutritionnels sont moins altérés qu'avec les techniques de chauffage classiques (Cappato et al., 2017) et permet la production de produits stables sans compromettre la couleur des aliments (Sakr et al., 2014).
- La cuisson ohmique améliore la qualité du produit : couleur, texture, goût et préservation des nutriments.
- L'absence de chauffage localisé réduit le risque de carbonisation des aliments et les problèmes d'adhérence en surface (Bozkurt et al., 2010). Le risque de dommages aux produits est faible, car la cuisson ohmique est indépendante de la convection et de la conduction et ne nécessite pas de surface chaude, évitant ainsi les brûlures et la surcuisson (Maloney et al., 2016). En conséquence, la qualité du produit sera améliorée (Sakr et al., 2014).
- Le processus de chauffage est très contrôlable : démarrage rapide et arrêt instantané. Par conséquent, il n'y a pas de transfert de chaleur résiduel après la coupure du courant (Sakr et al., 2014; Maloney et al., 2016).

- La cuisson ohmique peut être appliquée à une grande variété de produits alimentaires : liquides, solides et fluides-solides, tant que le produit alimentaire est pompable et possède une conductivité électrique appropriée (Bozkurt et al., 2010; Sakr et al., 2014; Maloney et al., 2016).
- La cuisson ohmique est adaptée aux produits à haute viscosité et aux applications à haute température (Maloney et al., 2016).

La technologie est très efficace : 95% de la puissance électrique appliquée est convertie en chaleur dans le produit et les temps de chauffage sont réduits de 90 à 95% par rapport au chauffage conventionnel (Bozkurt et al., 2010; Sakr et al., 2014; Maloney et al., 2016). Le processus est silencieux et écologique (Sakr et al., 2014).

3.3. DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DU CHAUFFAGE OHMIQUE

Il existe différentes configurations de cuisson ohmique : en lot (batch) et en flux continu (Maloney et al., 2016). La cuisson ohmique en flux continu est souvent utilisée dans des applications industrielles pour des produits liquides ou solides-liquides pouvant être pompés. Dans ce cas, les électrodes peuvent être disposées selon deux principales configurations : parallèles au flux et colinéaires (perpendiculaires au flux). Le système en lot correspond à une cuisson ohmique discontinue (sans circulation), qui peut être préférée pour des applications nécessitant des temps de traitement longs (par exemple, la cuisson d'un produit). Les figures ci-dessous illustrent les différentes configurations de cuisson ohmique (Gally et al., 2016) :

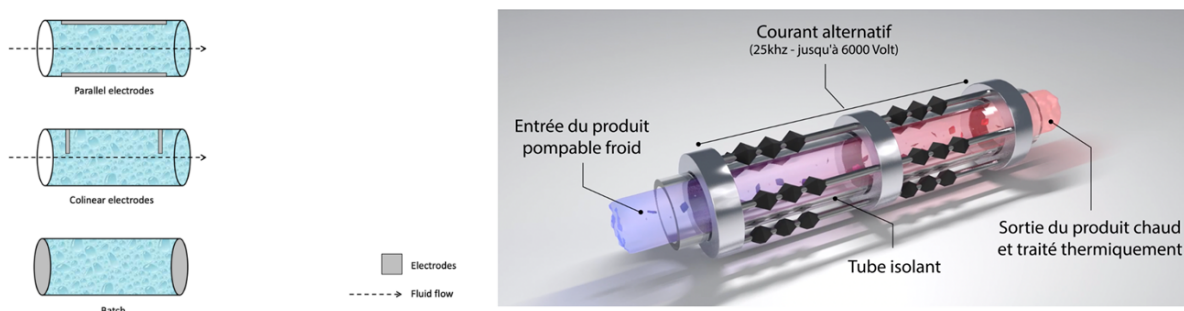


Figure 11 : différentes configurations de la cuisson ohmique (Gally et al., 2016)

3.4. APPLICATIONS ET PRODUITS UTILISANT LE CHAUFFAGE OHMIQUE

Au départ, le chauffage ohmique a été développé pour la pasteurisation/la stérilisation des produits alimentaires, qui demeure son principal domaine d'application. Aujourd'hui, cette technologie compte déjà de nombreuses applications dans l'industrie alimentaire (ainsi que dans divers autres domaines tels que le traitement chimique et le traitement des déchets) (Maloney et al., 2016).

Les aliments couramment utilisés incluent les produits à base de tomates, les préparations de fruits, les jus de fruits, les œufs liquides, les confitures, les compotes, les soupes et les plats mijotés. Comme mentionné précédemment, tant que le produit peut être pompé et possède une conductivité électrique adéquate, il convient généralement au chauffage ohmique (Tableau 5) (Maloney et al., 2016).

Voici quelques exemples :

- ⇒ Jus de grenade (Darvishi et al., 2013)
- ⇒ Pain sans gluten (Bender et al., 2019)
- ⇒ Pain classique (Gally et al., 2016)
- ⇒ Produits laitiers (Cappato et al., 2017; Jafarpour et al., 2022)
- ⇒ Viande hachée (Bozkurt et al., 2010)
- ⇒ Riz (Kanjanapongkul, 2017)

Dans l'exemple du pain sans gluten proposé par Bender et al. (2019), le chauffage ohmique a permis d'éviter le besoin de préchauffage (contrairement aux techniques conventionnelles). Il permet également d'atteindre rapidement et de manière volumétrique des températures élevées. Les résultats ont montré que le temps de cuisson requis était réduit, les propriétés fonctionnelles étaient améliorées et la consommation d'eau était réduite par un facteur de trois.

Tableau 5 : Conductivité électrique des aliments (Maloney & Harrison, 2016)

Food Products Electrical Conductivity	Electrical Conductivity (S/m) at 25 °C		Electrical Conductivity (S/m) at 25 °C
Vegetables		Juices	
Vegetable pieces	0.1–0.06	Tomato juice	0.863–1.5
Fruit pieces	0.05–0.15	Orange juice	0.567
Potato	0.04	Carrot juice	1.1
Carrot	0.025–0.042	Apple juice	0.25
Onion	0.022	Cranberry juice	0.1
Mushrooms	0.022	Orange juice	0.35–0.5
Cucumber	0.027	Pineapple juice	0.4
Turnip	0.026		
Parsnip	0.025	Others	
Brussels sprouts	0.009	Pickles and chutney	2.0–3.0
Tomato	0.045	Savoury sauces	1.6–1.8
Leeks	0.007–0.032	Soups	1.4–1.8
Celery	0.026	Pet food	0.7–1.2
Courgettes	0.017–0.032	Full-cream milk	0.52
Pepper	0.048	Dairy desserts (vanilla/custard)	0.38–0.50
Pear	0.041	Beaten egg	0.4
Apple	0.023	Margarine	0.027
Pea	0.17	Sugar syrup	0.001
Tomato, chopped	0.4–0.5	Milk	0.41
Fruit in syrup	0.2	Potable water	0.01–0.1
Meat		Beer	0.15
Chicken	0.08–0.37	Liquid egg	0.09
Pork	0.087–0.76	Jams and compotes	0.0005–0.05
Beef	0.42–0.44	Custard	0.25
Minced beef, lamb	0.8–1.2	Honey	0.02
Heterogeneous meat products	0.6–3.0		

3.5. ADAPTATION DU FOUR EN MILIEU SPATIAL

Le prototype du four ohmique réalisé par Emmepiemme SRL (Figure 12) n'est pas adapté au milieu spatial malgré ses moules adaptés à différentes cuissons. Le matériel prend beaucoup de place et n'est pas particulièrement ergonomique. L'incorporer dans la cuisine de la station spatiale n'est pas réaliste dans la configuration suivante. Avant l'arrivée des armoires chauffantes dans l'ISS, les astronautes avaient à leur disposition une mallette chauffante dans laquelle ils ont déjà réchauffés des pizzas¹⁵. Il serait envisageable de compacter tout le matériel nécessaire dans une unique mallette transportable afin de pouvoir la ranger et la déplacer facilement.

¹⁵ How to make pizza in space – Les astronautes réalisent des pizzas dans l'ISS | Chaîne : VideoFromSpace. 04/12/2017. YouTube. Consulté le 07 janvier 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=GIQXm3lq3d0>

Pour avoir un avenir dans les étoiles, le four devra également être adaptable, un maximum de produits devront pouvoir être préparés et cuisinés. Un four pour cuire exclusivement des biscuits ou tout autre produit n'a aucun avenir dans les missions spatiales. Le système d'entretien et de nettoyage doit également être simple et efficace.

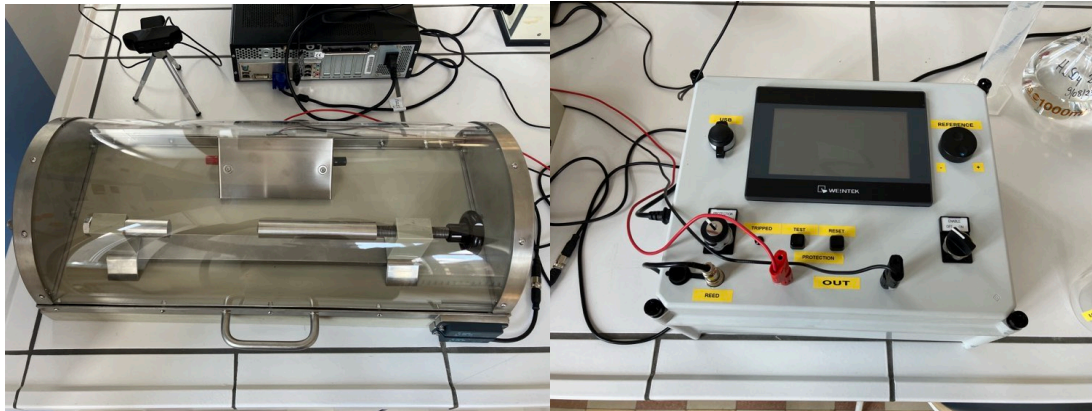


Figure 12 : Four ohmique à l'échelle pilote Mod. SPP 1.5.

4. COMPARAISON ENTRE LA CUISSON OHMIQUE ET LA CUISSON MICRO-ONDES

Dans le but de mettre en comparaison les deux techniques de cuisson, à savoir la cuisson ohmique et la cuisson par micro-ondes, le Tableau 6 a été élaboré pour comparer les différentes caractéristiques des cuissons micro-ondes et ohmique.

Tableau 6 : Tableau d'analyse comparative des différentes caractéristiques entre deux méthodes de cuisson : la cuisson ohmique et la cuisson par micro-ondes

Caractéristique	Cuisson ohmique	Cuisson micro-ondes
Principe de chauffage	Passage d'un courant électrique (Gally et al., 2016)	Ondes électromagnétiques (Franco et al., 2015)
Type de chauffage	Volumétrique (Gavahian et al., 2019)	Volumétrique (Gavahian et al., 2019)
Uniformité de chauffage	Très uniforme (Dornoush et al., 2022)	Non uniforme (Vadivambal et al., 2010)
Dépendance de la convection	Non (Maloney et al., 2016)	Non (Maloney et al., 2016)
Temps de chauffage	Rapide : 1°C par seconde (Fellows, 2016).	Rapide : chauffage instantané (Dahmoune et al., 2015)
Conservation des propriétés des aliments	Bonne(couleur, saveur, texture) (Cappato et al., 2017)	Stabilité des propriétés organoleptique (Dahmoune et al., 2015)
Adaptabilité des aliments	Convient à une variété de produits (Maloney et al., 2016)	Convient à certains types d'aliments (liquides, réchauffage) (Manickavasagan et al., 2006)
Effets sur les nutriments	Préservation de certains nutriments (Sakr et al., 2014)	Risque de perte de certains nutriments (Suarez et al., 2000)
Efficacité énergétique	Élevée (proche de 100% de transfert d'énergie électrique en chaleur) (Salengke, 2000)	Élevée (jusqu'à 70% de transfert d'énergie électromagnétique en chaleur) (Metaxas et al., 1983)

Consommation d'énergie	Peut être efficace en termes de transfert d'énergie, mais nécessite un approvisionnement en énergie électrique régulier	Plus élevée par rapport à la cuisson ohmique en raison de la conversion d'énergie électromagnétique en chaleur et des pertes liées aux ondes électromagnétiques
Application en espace	Possible avec adaptation	Possible, mais avec des limites et des considérations spécifiques

III. LA PÂTE À GAUFRE

1. LA RECETTE DES GAUFRES

Une gaufre est une pâtisserie cuite entre deux plaques chauffantes pour créer une texture croustillante à l'extérieur et moelleuse à l'intérieur. Les gaufres peuvent être préparées dans une variété de formes et de tailles, et elles sont souvent servies avec toutes sortes de garnitures telles que du sirop, de la crème fouettée, des fruits, du chocolat, etc. La gaufre est caractérisée par son physique particulier : des petits carreaux en creux¹⁶.

La pâte utilisée est considérée comme une pâte jaune d'après le traité de Miamologie (Lagorce et al., 2016). Celle-ci est décrite comme une pâte simple, facile à réaliser et inratable. La quantité d'eau est plus élevée que dans les autres types de pâte ce qui facilite le mélange.

Les composants principaux de la gaufre industrielle sont l'eau, la farine de blé (ou autre type de farine, dextrines et fibres), les produits sucrants (sucre, sirop, édulcorant ...), la matière grasse (beurre, huile ou crème), La lécithine et autres émulsifiants. Les composants secondaires sont les produits à base de lait, les œufs, les colorants, les toppings, épices, arômes, chocolat ... (Tiefenbacher, 2018). Une recette classique/maison sera plutôt composée de farine, de lait, de sucre, de beurre et d'œuf (Tableau 7)¹⁷.

Tableau 7 : Recette de gaufres faciles et légères (source : Marmiton¹⁷)

Recette de gaufres faciles et légères				
<u>Farine</u>	<u>Sucre</u>	<u>Beure</u>	<u>Œufs</u>	<u>Lait</u>
200 g	30 g	20 g	3 pièces	25 cl

¹⁶ Gaufre (cuisine) – Page wikipedia de la gaufre | 08/07/2023. Wikipédia. Consulté le 14 août 2023, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaufre_\(cuisine\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaufre_(cuisine))

¹⁷ Gaufres faciles et légères – Recette de gaufres | N.D. Marmiton. Consulté le 14 août 2023, https://www.marmiton.org/recettes/recette_gaufres-faciles-et-legeres_87278.aspx

2. PROCESSUS DE FABRICATION D'UNE GAUFRE INDUSTRIELLE ET MAISON.

Tout d'abord le diagramme de production a été adopté à l'aide des méthodes industrielles et ménagères (Figure 13). Le mode de préparation dans l'espace diffère légèrement des deux autres. Elle doit ressembler à une recette classique, mais avec une certaine automatisation et des rigueurs de niveau industriel.

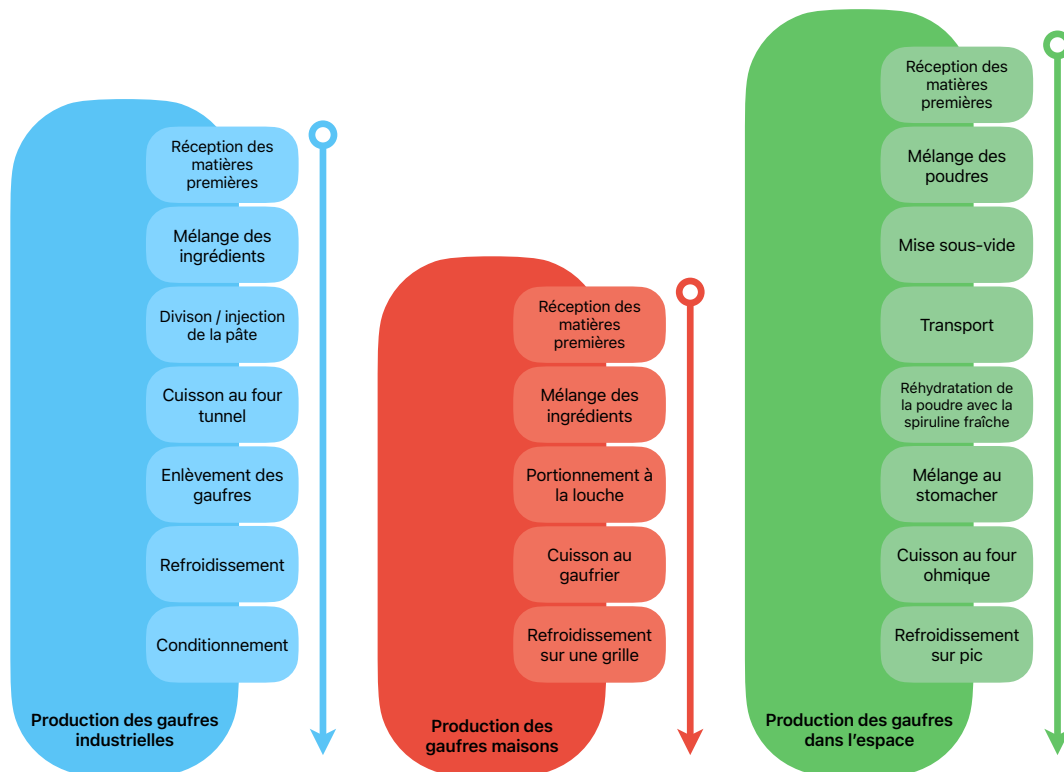


Figure 13 : Diagramme de fabrication des gaufres industrielles, faites maison et pour le milieu spatial

3. MATIÈRES PREMIÈRES

Dans la perspective de concevoir un produit destiné à l'espace, il est souvent nécessaire de prendre en compte les contraintes liées à l'espace et au transport. Les recettes de base sont adaptées pour inclure des ingrédients déshydratés. Par exemple, la farine, les œufs, le lait et d'autres ingrédients liquides sont transformés en poudre déshydratée pour former un mix sec, léger et durable, ce qui facilite leur stockage et leur transport sur de longues missions spatiales. La farine de riz, le sucre et la poudre de lait sont assemblés pour former la première partie de la recette. Cette préparation est réalisée sur Terre et ensuite expédiée dans l'espace. La deuxième partie de la recette inclut les microalgues, qui sont ajoutées à la première partie une fois dans l'espace. Cette combinaison des deux parties forme la pâte nécessaire. Enfin, cette pâte est cuite dans un four ohmique pour créer la gaufre finale.

3.1. MIX SEC

3.1.1. FARINE DE RIZ

Plusieurs choix de farine sont disponibles : farine de blé, de maïs, de pois, d'avoine, d'amande... toutes ont des caractéristiques intéressantes dans la préparation de nombreuses recettes. La farine de riz a été choisie essentiellement parce que la production de riz est étudiée au sein du compartiment C4b du système MELiSSA¹⁸ et il s'agit d'un produit qui s'incorpore facilement dans de nombreuses recettes ; cette farine permet la production d'un grand panel de produits (Gharibzahedi, 2018).

COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES

La composition nutritionnelle détaillée de la farine de riz est exposée dans le Tableau 44 de l'Annexe II.

L'intérêt de la farine de riz est essentiellement au niveau de l'apport en glucides. L'apport en protéines et en lipide est plutôt faible, cependant la qualité des protéines est meilleure que dans d'autres céréales. La quantité de lysine (facteur limitant des céréales) contenue dans les protéines est plus élevée ce qui augmente la valeur biologique des protéines et le coefficient d'utilisation des protéines. Un autre point d'intérêt de ces protéines est leur propriété hypoallergénique. (ZHOU, 2006). Les minéraux et protéines contenus dans la farine de riz vont diminuer avec le degré de raffinement des grains (Qian et al., 2013).

PROPRIÉTÉS / FONCTIONNALITÉS

La farine de riz possède différentes propriétés qui peuvent être intéressantes en fonction du produit développé. La densité, la matière sèche et l'eau, la capacité d'absorption de l'eau et des matières grasses, le pH et la capacité de gonflement sont des paramètres intéressants pour évaluer la qualité d'une farine de riz (RAZAFIMAHEFA et al., 2021).

Certains paramètres rhéologiques sont importants à étudier telle que la viscosité ; plus la température, le cisaillement et l'humidité de la farine augmentent, plus la viscosité diminue (Dautant et al., 2007). Dans le processus de gélatinisation l'amidon du riz va être le principal responsable de la gélatinisation d'un produit ; l'amidon va se lier avec l'eau et gonfler avec l'augmentation de température (Figure 14) (Qian et al., 2013). Ces paramètres vont être influencés par le type de riz (Saif et al., 2003).

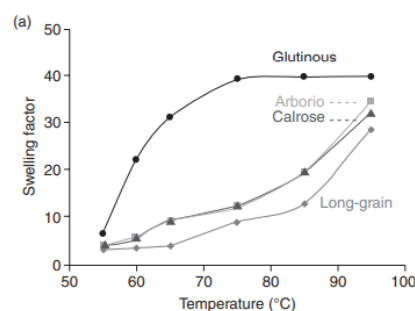


Figure 14 : Facteur de gonflement de l'amidon de riz en fonction de la température (Chung et al., 2011)

¹⁸ Compartiment IV : The photoautotrophic compartment – Fonctionnement du compartiment CIV | N.D. ESA. Consulté le 8 janvier 2023, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Melissa/Compartiment_IV_The_photoautotrophic_compartment

3.1.2. FARINE DE BLÉ

La farine est l'ingrédient de base des produits céréaliers. Elle résulte de la mouture du grain de blé, nettoyé et industriellement pur (Kiger et al., 1967). Le blé est la céréale la plus cultivée dans le monde (estimations FAO 2022 : 2.774 millions de tonnes) dont il existe de nombreuses variétés. Plus de 24 sont cultivées sur le territoire Belge, mais de manière générale, elles sont toutes regroupées en deux catégories : le blé tendre donne une farine ayant de bonnes aptitudes pour la panification et le blé dur est utilisé pour la fabrication de la semoule et des pâtes.

COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES

D'un point de vue nutritionnel, la farine de blé se compose essentiellement des glucides complexes (amidon) ; des protéines solubles (albumines et globulines) ; des protéines insolubles (gliadines et gluténines) ; de l'eau ; des fibres alimentaires, des minéraux, des vitamines et très peu de matières grasses (MacRitchie, 1984; Meuser et al., 1986). La composition nutritionnelle détaillée est exposée dans le Tableau 45 de l'Annexe II.

Contrairement à la farine de riz, la farine de blé contient naturellement du gluten qui a pour propriété de donner du volume et de l'élasticité aux produits en leur procurant une texture moelleuse. En revanche, elle est pauvre en lysine, mais elle est riche en acides aminés soufrés. De plus, la farine de blé est une excellente source de vitamine B1 et de vitamine E qui peut agir comme un agent antioxydant (Feillet, 2000).

PROPRIÉTÉS / FONCTIONNALITÉS

La farine de blé joue un rôle essentiel dans la recette de gaufres grâce à ses propriétés diverses. Son gluten forme une structure élastique, donnant aux gaufres leur texture moelleuse à l'intérieur et croustillante à l'extérieur (Kiger et al., 1967). Elle lie les ingrédients, favorise le gonflement et maintient la consistance de la pâte (Kiger et al., 1967). De plus, la farine de blé apporte de la couleur, de la saveur et de la stabilité à la recette, créant ainsi la base fondamentale pour des gaufres délicieuses et bien formées (Feillet, 2000).

3.1.3. LE SUCRE BRUN

Le sucre est apporté essentiellement pour le goût sucré. Il s'agit d'un produit particulièrement apprécié de tout temps ; dans son livre « La physiologie du goût », Jean Brillat-Savarin (1755-1826) le décrivait comme un produit important au quotidien (Brillat-Savarin, 2014). D'après Mendonça et al. (2000) Ce produit est en général consommé par une population qui a pour habitude de réduire les aliments ultra-transformés.

COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES

Le sucre brun est composé à 98% de glucides (essentiellement du saccharose), ce qui permet un apport énergétique rapidement disponible ce qui est intéressant pour certaines activités sportives et en combinaison avec des protéines peut favoriser l'anabolisme musculaire après une activité physique grâce à l'augmentation d'insuline dans le corps (Guezennec et al., 2017).

Le caractère non raffiné de la cassonade permet de garder plus de minéraux ce qui lui donne sa couleur et son goût caractéristique (Orlandi et al., 2017). Cependant, la teneur en minéraux n'est pas

particulièrement intéressante car la quantité de sucre maximale recommandée et l'apport en minéraux qui en découlent est anecdotique par rapport aux besoins de l'astronaute¹⁹.

La composition complète du sucre brun est reprise dans le Tableau 46 en Annexe II.

Le sucre brun présente un intérêt particulier en raison de sa teneur en minéraux supérieure à celle du sucre blanc lorsqu'il est dissous dans un milieu aqueux, ce qui entraîne une augmentation de la conductivité électrique (Thomason et al., 2019).

La cassonade possède un bouquet aromatique différent du sucre blanc. Des analyses ont mis en évidence 47 composés aromatiques avec comme composés dominants les cétones, les pyrazines, les alcanes, les phénols et les alcools qui participent au goût caramélisé, sucré et fruité du produit (Liu et al., 2021).

3.1.4. LE LAIT ET LA POUDRE DE LAIT ENTIER

La poudre de lait est un produit laitier obtenu par déshydratation du lait, avec la teneur en matière grasse et en protéines qui peut être ajustée ; la teneur en eau n'excède pas 5 % en poids du produit fini (Codex Alimentarius et al., 1999). La déshydratation du lait permet une conservation à température ambiante pour des périodes considérables, grâce à la réduction de la teneur en eau. Cependant, la poudre de lait est sensible aux variations de température et d'humidité. Il est donc nécessaire de la conserver dans des conditions appropriées, à l'abri de la lumière, de l'humidité et de la chaleur. En outre, il est recommandé d'utiliser ou de consommer immédiatement après la reconstitution du lait en poudre pour éviter tout risque de détérioration. (Mil et al., 1991).

COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES

La poudre de lait est très riche au niveau nutritionnel (Anses, 2020a). Elle contient des nutriments essentiels pour l'être humain (Debry, 2000). La composition de la poudre varie en fonction du type de lait, mais tous les nutriments sont toujours présents, en participant ainsi à la constitution et à l'entretien de l'organisme (Codex Alimentarius et al., 1999).

La teneur élevée en protéines de la poudre de lait confère un atout nutritionnel considérable en raison de sa composition en acides aminés essentiels, qui sont des nutriments fondamentaux pour l'organisme humain et ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme. Les protéines laitières en particulier ont été reconnues comme étant importantes pour la croissance et le maintien de la masse musculaire chez les individus. (Takada et al., 1997).

Outre les protéines, la poudre de lait contient également d'autres nutriments essentiels tels que des lipides, des glucides, des minéraux et des vitamines. Ces nutriments contribuent à un apport équilibré en nutriments pour l'organisme humain. (Anses, 2020a).

Les lipides sont caractérisés par une très grande variété d'acides gras, une source importante d'énergie (Collomb et al., 1999). De plus, ils contiennent également des vitamines dites liposolubles, vitamines A, D, E et K. auxquelles, La vitamine D joue un rôle important dans l'absorption du calcium.

Les glucides sont constitués essentiellement du lactose qui favorise l'absorption du calcium et également des oligosaccharides qui participent à l'équilibre de la flore intestinale (Cochet et al., 1983).

¹⁹ Sugars, brown – FoodData Central Search Results | 04/01/2019. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Consulté le 08 janvier 2023, <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/168833/nutrients>

La poudre de lait est connue également pour sa richesse en calcium et en phosphore qui sont indispensables à l'élaboration et l'entretien du tissu osseux et contribuent ainsi à la prévention de l'ostéoporose (Gueguen, 2002). En plus des nutriments mentionnés précédemment, la poudre de lait contient également des minéraux tels que le potassium, le sodium et le magnésium. Elle est également une source d'oligo-éléments tels que le zinc, le fer, le cuivre, l'iode et le sélénium qui sont importants pour l'organisme humain et sont souvent associés à des problèmes de carence nutritionnelle. Ces minéraux et oligo-éléments contribuent à une alimentation équilibrée et à la santé globale de l'individu. (Martin, 2001).

PROPRIÉTÉS / FONCTIONNALITÉS

Les caractéristiques nutritionnelles de la poudre de lait sont intéressantes, mais les propriétés fonctionnelles le sont tout autant. Ce produit possède des propriétés moussantes, texturantes et émulsifiantes. Ces caractéristiques vont varier en fonction du type de séchage ; le séchage par roller fournit une poudre de moins bonne qualité, plus difficile à solubiliser mais son goût est particulièrement intéressant. Le séchage par atomisation permet d'avoir des caractéristiques plus intéressantes (Schuck, 2011, 2015). Ces propriétés sont intéressantes pour le développement du dessert afin d'avoir une structure homogène, souple et stable.

3.1.5. ŒUFS EN POUVRE

L'œuf en poudre est un produit obtenu à partir de l'œuf classique qui a été vidé de son eau et qui a été réduit en poudre.

COMPOSITION ET PROPRIÉTÉS NUTRITIONNELLES

Le processus de transformation de l'œuf ne change en rien la teneur nutritionnelle, qui reste identique à celle de l'œuf frais. Les œufs, reconnus pour leur grande valeur nutritionnelle, renferment une variété de vitamines et de minéraux. Toutefois, divers éléments tels que le régime alimentaire de la poule pondeuse, son âge, sa lignée et les conditions environnementales peuvent influencer la composition de ces nutriments. (Samman et al., 2009). Néanmoins, la teneur en macronutriments des œufs en poudre comprend de faible portion en glucides et environ 7,21 g pour 15 g de protéines et 6,06 g de lipides, dont la plupart sont insaturés et apportent au régime alimentaire plusieurs nutriments essentiels (Tableau 8). Certains de ces nutriments, tels que le zinc, le sélénium, le rétinol et les tocophérols, sont déficients chez les personnes suivant un régime alimentaire occidental et, compte tenu de leur activité antioxydante, peuvent protéger les humains de nombreux processus dégénératifs, y compris les maladies cardiovasculaires (Natoli et al., 2007).

Il existe également des preuves scientifiques que les œufs contiennent d'autres composés biologiquement actifs qui peuvent jouer un rôle dans la thérapie et la prévention des maladies chroniques et infectieuses. La présence de composés aux propriétés antimicrobiennes, immunomodulatrices, antioxydantes, anticancéreuses ou antihypertensives a été rapportée dans les œufs (Abeyrathne et al., 2013). De plus, la poudre des œufs est une source importante de lécithine et est l'une des rares sources alimentaires qui contient des concentrations élevées de choline (Zeisel et al., 2003; Herron et al., 2004). La lécithine, en tant que phosphatidylcholine polyinsaturée, est un composant fonctionnel et structurel de toutes les membranes biologiques, qui agit dans l'étape limitant la vitesse de l'activation des enzymes membranaires telles que la superoxyde dismutase. Il a été suggéré qu'une activation inefficace de ces enzymes antioxydantes conduirait à une augmentation des dommages des membranes par les espèces réactives de l'oxygène. De plus, la lécithine augmente

la sécrétion de bile, empêchant la stagnation dans la vessie et, par conséquent, diminue la lithogénicité (Herron et al., 2004).

Tableau 8 : Composition nutritionnelle de la poudre d'œuf entier (portion individuelle : 15g) (Source : Tables Ciquial).

Composant	Quantité	Composant	Quantité
Energie (kcal)	88.80	Folate DFE (μg)	17.85
Protéine (g)	7.21	Vitamine B12 (μg)	0.44
Glucide (g)	0.08	Vitamine A RAE (μg)	45.15
Calcium Ca (mg)	36.60	vitamine E (mg)	0.58
Fer Fe (mg)	1.08	vitamine D (μg)	1.00
Phosphore P (mg)	94.35	Acide Pantothénique B5 (mg)	0.64
Potassium K (mg)	81.00	Choline (mg)	122.00
Cuivre Cu (mg)	0.03	vitamine K (phylloquinone) (μg)	0.18
Sélénium Se (mg)	12.50	Lipides (g)	6.06
Zinc Zn (mg)	0.47	Acide Linoléique N6 (g)	0.64
Thiamine (mg)	0.03	acide α -Linoléique N3 (g)	0.02
Riboflavine (mg)	0.30	DHA (g)	0.03
Vitamine B6 (mg)	0.07		

RAE : équivalent d'activité rétinol DHA : acide docosahexaénoïque

PROPRIÉTÉS / FONCTIONNALITÉS

Les caractéristiques fonctionnelles de l'œuf ont été abordées par Mine (1995, 2002), et celles-ci sont étroitement liées aux protéines et aux phospholipides constitutifs de l'œuf. Ces propriétés fonctionnelles jouent un rôle essentiel dans la formation et le maintien de la structure de la pâte ainsi que du produit final, comme indiqué dans les travaux de Wilderjans et al. (2013) et Deleu et al. (2016). En effet, la pâte se présente généralement sous forme d'une émulsion fouettée, résultant de l'incorporation d'air et de la dispersion de la phase grasse au cours du processus de battage. On peut identifier les pouvoirs moussant, émulsifiant et gélifiant. (Figure 15) :

- Pouvoir moussant : Pendant la cuisson, les protéines globulaires présentes dans le blanc d'œuf jouent un rôle crucial en maintenant la stabilité des bulles d'air. Ce phénomène repose sur une restructuration rapide de leur configuration moléculaire, aboutissant à la création d'une couche protectrice à la surface des bulles d'air (Mine, 2002; Wilderjans et al., 2013).

- Pouvoir émulsifiant : Les capacités émulsifiantes du jaune d'œuf proviennent de la présence de lipoprotéines de faible densité (LDL), lesquelles réduisent la tension à l'interface en raison de leurs phospholipides. Parallèlement, elles forment un film protecteur (protéines) autour des petites gouttes de matière grasse. Cette combinaison favorise la dispersion minutieuse des gouttes de matière grasse au cours du processus de battage, ce qui en retour stabilise l'émulsion huile/eau.

- Pouvoir gélifiant : Stabilisation de la texture via la coagulation des protéines présentes dans l'œuf, conformément aux travaux de Guy et al. (1981), ce qui contribue à obtenir une consistance moelleuse.

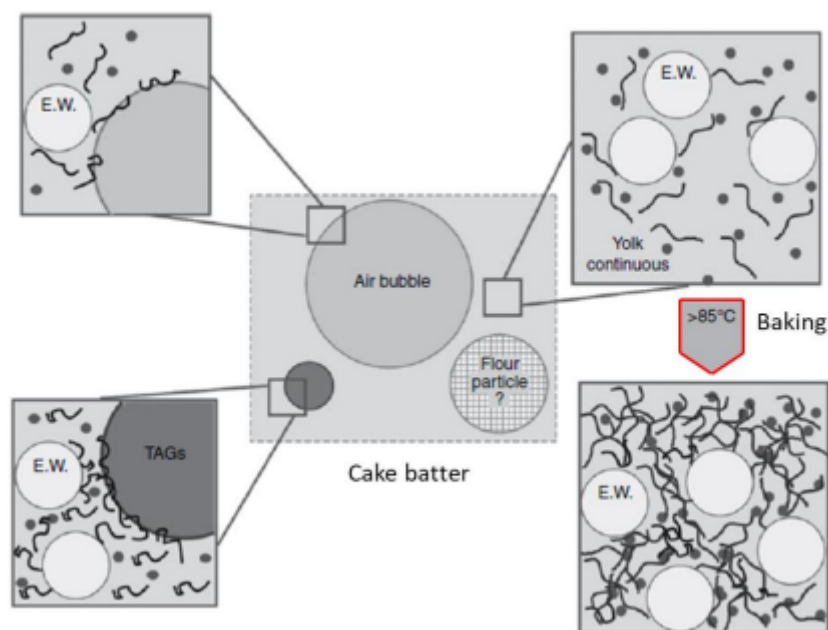


Figure 15 : Schéma illustrant les propriétés fonctionnelles des protéines de l'œuf dans les cakes; EW: egg white, TAGs: triacylglycérols (Kiosseoglou et al., 2005)

3.1.6. MATIÈRES GRASSES

Les matières grasses peuvent être sous forme liquide ou solide, la plage de fusion varie en fonction de la longueur de la chaîne carbonée et du nombre de doubles liaisons (Boutonnier, 2006). Elles sont source d'énergie et permettent de transporter les vitamines liposolubles (A, D, E, K) (Danthine, 2010). Cependant dans l'industrie agro-alimentaire, elles sont essentiellement utilisées pour leurs propriétés techno-fonctionnelles : sensorielle (sapidité, rétention d'arôme, etc) et structure (apparence, texture, plasticité, rhéologie, consistance, etc). (Danthine, 2010; Morin et al., 2012).

Pour réaliser une pâtisserie, l'idéal est d'avoir une matière grasse cristallisée, d'autant que pour être envoyée dans l'espace avec de la poudre, il ne serait pas idéal de l'avoir sous forme liquide. Comme dans la plupart des denrées alimentaires de type pâte à gâteaux/biscuits, la phase grasse se trouve sous forme dispersée dans l'aliment (Cansell, 2005). Un des intérêts de la matière grasse du lait, malgré un profil riche en AGS optimise l'assimilation des AGPI (Rioux et al., 2013).

3.1.7. LEVURE CHIMIQUE

La levure chimique, également appelée poudre à lever, est habituellement constituée de 3 agents : un basique, un acide et un stabilisant. La plupart se compose de bicarbonate de sodium, de crème de tartre avec de l'amidon (de blé ou de maïs) pour absorber l'humidité et éviter que la réaction se déclenche avant utilisation. En présence d'eau, les constituants vont réagir et produire une réaction chimique de type acide-base et produit du CO₂. Elle est utilisée dans de nombreuses préparations telles que les madeleines, les cakes, les cookies, les gaufres, etc²⁰.

²⁰ La levure chimique – informations relative à la levure chimique | Laurent Lefebvre. N.D. Devenir pâtissier. Consulté le 28 juin 2023, <https://devenirpatissier.fr/la-levure-chimique/>

La poudre à lever n'a aucun intérêt nutritionnel, elle est utilisée uniquement pour sa capacité à lever et aérer les pâtes. Plusieurs assemblages d'agents différents existent ayant des caractéristiques de levage et d'aération variées (Sandoval et al., 2020; Asamoah et al., 2023).

L'avantage des poudres à lever est qu'elles sont rapides, stables et une quantité faible permet une production de gaz conséquente (Revy, 2005).

3.2. MICROALGUES

Une fois que le mélange sec est en orbite, une étape cruciale intervient; l'incorporation de microalgues fraîches, à 20 % de matière sèche axénique, cultivées à bord de la navette spatiale. Cette méthode permet de proposer une ration quotidienne adaptée pour 1 à 2 astronautes. Toutes les informations relatives aux microalgues sont développées au chapitre I point 4 : Les microalgues.

4. DIAGRAMME DE PRODUCTION

Ce projet s'intégrant dans les stratégies actuelles développées par l'ESA de systèmes alimentaires plus autonomes pour les missions spatiales de longue durée, et mise en œuvre à travers le projet Melissa, le concept du produit et son procédé devront au maximums respecter les critères ALISSE.

Le concept suivant est dès lors proposé : les ingrédients seront regroupés en deux fractions, d'une part, la biomasse microbienne fraîche à 20 % de matière sèche produite de manière journalière par l'incubateur axénique du compartiment IV et d'autre part, une fraction sous forme de poudre produite sur terre et conditionnée en poches plastiques sous-vide contenant les autres ingrédients sous forme sèche (œufs, lait, sucre, matière grasse). Lors de la préparation par les astronautes, la poche sous-vide est raccordée à l'incubateur et la biomasse transférée dans la poche. La poche est placée dans un mélangeur de type Stomacher et le mélange intégré dans le four ohmique pour la cuisson. La gaufre peut ensuite être consommée directement, la cuisson étant très rapide.

Ce procédé permet de limiter :

- ⇒ Les dangers de contamination ;
- ⇒ La manutention par les astronautes ;
- ⇒ La quantité de denrées alimentaires emportée à bord ;
- ⇒ Les dépenses énergétiques grâce à l'utilisation de procédés sobres de mélange et de cuisson ;
- ⇒ Le poids et l'encombrement dans la navette, le système étant assez compact ;
- ⇒ Le dégagement de chaleur dans le compartiment.

La Figure 16 reprend le concept dans sa globalité et la Figure 17 schématise la méthode de production du dessert dans la navette.

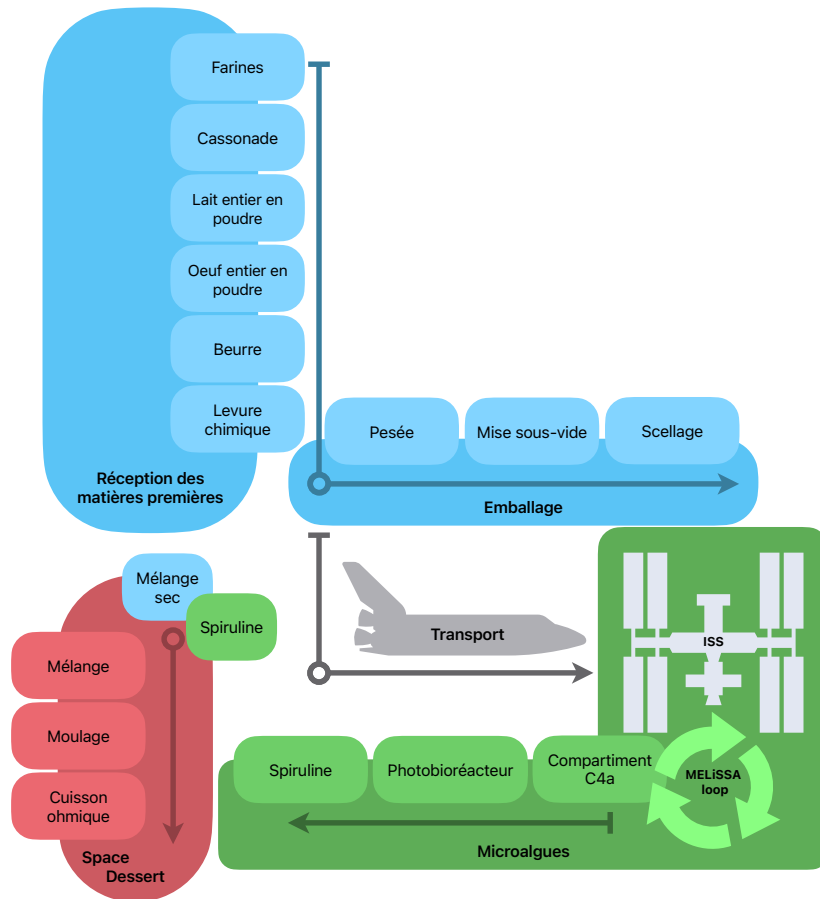


Figure 16 : Diagramme de production du Space Dessert

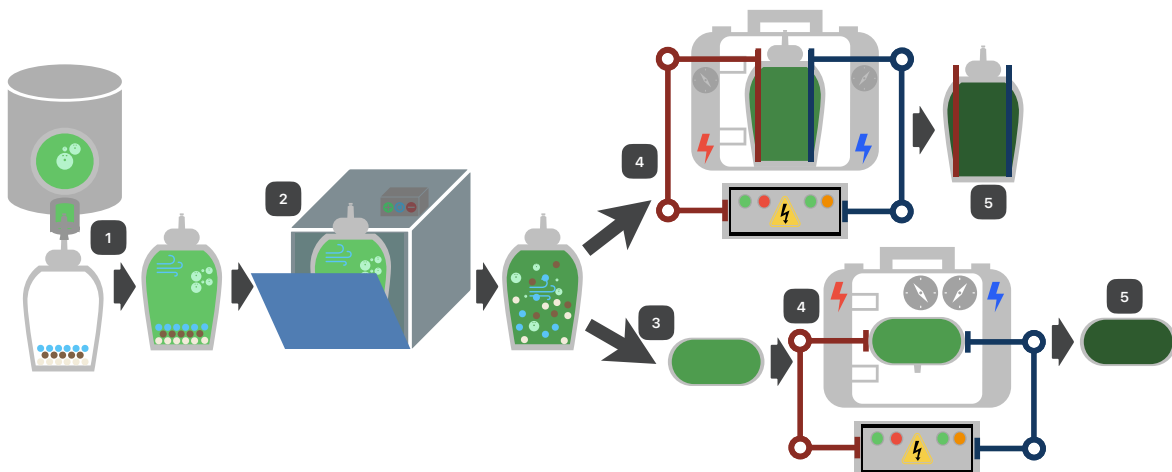


Figure 17 : Concept de la production d'une gaufre cuite au four ohmique en milieu spatial.

1. La spiruline est ajoutée dans la poche sous-vide avec une valve anti-reflux empêchant la sortie de poudre ou de microalgues.
2. La poche est mise dans un mélangeur/homogénéisateur. Deux étapes sont envisageables. Soit la poche est équipée d'électrodes et ne nécessite pas le passage de l'étape 3, soit la poche n'est pas équipée d'électrodes et doit passer par une étale de moulage.

3. Le contenu de la poche est transféré dans un moule antiadhésif équipé d'électrodes.
4. La pâte à gaufre est cuite au four ohmique.
5. La gaufre est cuite et prête à être dégustée après un petit temps de refroidissement.

5. SÉCURITÉ ET CONSERVATION

La sécurité et la conservation des aliments font partie du noyau du secteur de l'alimentation et de la distribution. Il est impératif d'identifier les risques potentiels lors de la préparation des denrées afin d'anticiper les éventuels problèmes pouvant impacter la santé des consommateurs. Ces aspects sont d'autant plus importants dans le milieu spatial car il n'y a pas de médecins sur place et la disponibilité en médicaments est très limitée.

Ce point reprend les dangers potentiels identifiés ainsi que leurs limites acceptables en sortie de production pour le mélange de poudre destiné à être envoyé dans l'espace. Les données fournies se basent sur la rédaction d'un plan HACCP. Cependant, elles ne se veulent pas complètes étant donné qu'elles se basent sur un système de production fictif et non déterminé de manière définitive. Elles peuvent toutefois servir de base à la rédaction d'un futur plan HACCP et mettre le doigt sur des étapes critiques de la production.

A. LES DANGERS POTENTIELS

Les dangers potentiels sont repris par étape de production. 4 étapes ont été retenues : la réception des ingrédients et emballages, la pesée des ingrédients, le conditionnement et le stockage. Pour chaque étape, les dangers ont été structurés par catégorie (risque microbiologique, risque chimique, risque physique) et par cause principales (personnel, opération, matériel, intrants, environnement). Les informations sont reprises dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Liste des dangers potentiels par étape avec leurs causes primaires (CP), leurs causes secondaires et les dangers potentiels.
(P = personnel ; O = opération ; M = Matériel ; I = intrants ; E = environnement) (rouge = risques microbiologique ; bleu = risques chimiques ; vert = risques physiques)

ETAPE	CP	CAUSE SECONDAIRE	DANGERS
Réception des ingrédients et emballages : - farine - oeufs en poudre - lait en poudre - cassonade - levure chimique - beurre	P	Hygiène du personne	bactéries (Shigella, Clostridium Perfringens, Campylobacter), virus (hépatite A, norovirus)
	O	Mauvaise gestion des stocks	dépassement DLUO
		Mauvais déconditionnement	Exposition prolongée des denrées à l'air avec risque de contamination par des micro-organismes.
	M	Étagères contaminées bacs de stockage contaminés Conditionnement défectueux	Exposition prolongée des denrées à l'air avec risque de contamination par des micro-organismes.
I	Contamination des matières premières avant réception	<u>Farines</u> : bactéries (Escherichia Coli producteurs de shigatoxines), champignons-moisissures (Aspergillus sp. Et Penicillium sp.) <u>Lait</u> : bactéries (Enterobacteriaceae, Listeria Monocytogenes, Staphylococcus Enterotoxines, Staphylococcus Coagulase, Salmonella sp.), champignons-moisissures (Penicillium sp.) <u>Œufs</u> : bactéries (Enterobacteriaceae, Salmonella sp., Bacillus Cereus) <u>beurre</u> : bactéries (Enterobacteriaceae, Listeria Monocytogenes, Staphylococcus Coagulase, Salmonella sp., Escherichia Coli)	

ETAPE	CP	CAUSE SECONDAIRE	DANGERS
	E	Gestion de l'humidité Mauvais maintien des T°C Présence de nuisibles	Les produits sont secs et l'eau ambiante peut facilement se lier aux produits et favoriser le développement de micro-organismes. Présence de nuisibles (rongeurs et insectes) pouvant transporter des micro-organismes pathogènes, des virus, des excréments, des poils.
	P	Non-respect des règles d'hygiène	vernis à ongle
	O	Mauvaise gestion des stocks nettoyage avec DA dans la salle	Résidus de solvants de nettoyage et désinfection.
	M	Matériel de réception contenant des résidus de produits de nettoyage	Résidus de solvants de nettoyage et désinfection.
	I	contamination des matières premières avant réception	Farines : intrants (mauvaise gestion des pesticides, fongicides, traitement des nuisibles etc), métaux lourds (lesquels ?), toxines (lesquelles ?) Lait : résidus d'antibiotiques, toxines oeufs : résidus d'antibiotiques, beurre : résidus d'antibiotiques, toxines
	E	Gestion des nuisibles	solvants de nettoyage et désinfection, appâts pour nuisible, insecticides
	P	BPH non respecté	boutons, pression, cheveux, pensements, bijoux, ongles, vernis à ongle, gants
	O	Mauvais déconditionnement	morceaux/résidus d'emballages (papier, carton, plastique, métal)
	M	Conditionnement défectueux	morceaux/résidus d'emballages (papier, carton, plastique, métal)
	I	Mauvais déconditionnement, appât au-dessus des denrées alimentaires, lampes à insectes	morceaux/résidus d'emballages (papier, carton, plastique, métal), insectes, projection
	E	Gestion des nuisibles, environnement insalubre	peinture, bois, carton, papier, pierre, métal.
	Pesée des ingrédients : - Balance - Cuillères - récipient - sac contenant	P	Mauvaise hygiène du personnel
O		Stockage des matières premières à l'air libre	Développement des micro-organismes déjà présents dans le produit ou de l'environnement de stockage
M		Matériel de pesée contaminé	Contamination du produit par micro-organisme par le matériel
I		Contamination des matières premières	micro-organismes déjà présents dans les produits individuellement.
E		Gestion de l'humidité Mauvais maintien des T°C Présence de nuisibles	Les produits sont secs et l'eau ambiante peut facilement se lier aux produits et favoriser le développement de micro-organismes. Présence de nuisibles (rongeurs et insectes) pouvant transporter des micro-organismes pathogènes, des virus, des excréments, des poils.
P		Non-respect des règles d'hygiène	Vernis à ongle
O		Mauvais nettoyage de la balance, des surfaces, du matériel, des récipients de stockage et contenants	Résidus de solvants de nettoyage et désinfection.

ETAPE	CP	CAUSE SECONDAIRE	DANGERS
	M	Rincage insuffisant des machines, surfaces, matériel, stockage dans récipients et des contenants, de nettoyage,	Résidus de solvants de nettoyage et désinfection.
	I	Contamination des matières premières	Contaminants déjà présents dans les produits individuellement.
	E	Gestion des nuisibles	solvants de nettoyage et désinfection, appâts pour nuisible, insecticides
	P	BPH non respecté	boutons, pression, cheveux, pensements, bijoux, ongles, vernis à ongle, gants
	O	BPF non respecté	morceaux/résidus (papier, carton, plastique, métal), insectes, projection
	M	Mauvais entretien du matériel	morceaux/résidus (papier, carton, plastique, métal), insectes, projection
	I	Intrants	Pierre, bois, terre, carton, papier, étiquette, insectes
	E	Mauvais entretien de l'environnement	Peinture, morceau de bois, de plastique, de verre, de métal, nuisibles
Conditionnement : - sous-videuse	P	Manque d'hygiène du personnel	bactéries (Shigella, Clostridium Perfringens, Campylobacter), virus (hépatite A, norovirus)
	O	Emballage non conforme ou abîmé Défaut du scellage de la machine	Entrée d'oxygène et d'humidité dans l'emballage et développement des micro-organismes déjà présents dans le produit.
	M	Matériel et surface de conditionnement contaminés	Contamination du produit par le matériel.
	I	-	-
	E	Disfonctionnement dans le sous-vidage / le scellage	Risque d'entrée d'air et d'humidité favorisant le développement de micro-organismes aérophiles.
	P	Non-respect des règles d'hygiène	Vernis à ongle
	O	Mauvais nettoyage de la sous-videuse	Résidus de solvants de nettoyage et désinfection.
	M	-	-
	I	-	-
	E	Disfonctionnement dans le sous-vidage / le scellage	favorise l'oxydation des matières grasses et des protéines.
	P	BPH non respecté	boutons, pression, cheveux, pensements, bijoux, ongles, vernis à ongle, gants
	O	Emballage non conforme ou abîmé Défaut du scellage de la machine	Morceaux/résidus de plastiques
	M	-	-
	I	Intrants	Pierre, bois, terre, carton, papier, étiquette, insectes
	E	Mauvais entretien de l'environnement	Peinture, morceau de bois, de plastique, de verre, de métal, nuisibles
Stockage	P	-	-
	O	Emballage percé ou déchiré lors du transport	Développement des micro-organismes déjà présents dans le produit ou de l'environnement de stockage

ETAPE	CP	CAUSE SECONDAIRE	DANGERS
		Durée de conservation trop longue	
	M	Etagère de stockage abimée => emballage abimée Manque d'hygiène du matériel	Entrée d'oxygène dans l'emballage et développement des micro-organismes déjà présents dans le produit.
	I	-	-
	E	-	-
	P	-	-
	O	Emballage percé ou déchiré lors du transport	Résidus de solvants de nettoyage et désinfection.
	M	Etagère de stockage abimée => emballage abimée Manque d'hygiène du matériel	Résidus de solvants de nettoyage et désinfection.
	I	-	-
	E	-	-
	P	-	-
	O	Emballage percé ou déchiré lors du transport	Morceaux/résidus de plastiques, métal, bois
	M	Etagère de stockage abimée => emballage abimée Manque d'hygiène du matériel	Morceaux/résidus de plastiques, métal, bois
	I	-	-
	E	-	-

B. LIMITES ACCEPTABLES DES DANGERS POTENTIELS

Les limites acceptables pour les dangers identifiés ci-dessus ont été déterminés à l'aide des législations Européennes en application (Règlement 2073/2005, règlement 1881/2006) ainsi que des documents d'organismes de contrôle (AFSCA, CNA) lorsqu'aucune limite n'était déterminée dans la législation. Ces limites identifiées serviront entre autre à définir le cahier des charges ainsi qu'au contrôle de la qualité du produit fini. Il est important de garder en tête que même si des limites ne sont pas déterminées pour d'autres risques, le produit se doit de ne présenter aucun risque pour la santé du consommateur. Ces données sont reprises dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Evaluation des dangers potentiels et niveau acceptable en sortie de production du produit (réhydraté), (rouge = risques microbiologique ; bleu = risques chimiques ; vert = risques physiques)

Dangers		Contaminants	Conditions limites de développement / destruction	Niveau acceptable en sortie de production (produit réhydraté)
Classe	Nom			
Bactéries	Escherichia coli producteurs de shigatoxines (STEC)	Farines	Température <6°C ou > à 45,5°C pH <4,4 ou >9 Aw <0,95 NaCL > 8,5% D _{60°C} (4) = 0,5 à 3 min et z (5) = 3,5 à 7°C (Anses, 2019)	Aucune trace détectée dans 25g (AFSCA, 2019, p. 2)
	Enterobacter spp.	Poudre de lait, oeufs en poudre, beurre	Chaleur humide 121°C 15-30' Chaleur sèche 160-170°C 1-2h ²¹	BP n = 5 BP c = 2 LIM m = 10 cfu/g LIM M = 100 cfu/g (Règlement 2073/2005, 2005)
	Listeria Monocytogenes	Poudre de lait, beurre	Température <-2°C ou > à 45°C pH <4 ou >9,6 Aw <0,92 NaCL > 12% Valeurs de D et z : D _{65°C} = 0,2 à 2 min ; z = 7,5°C (4 à 11°C) (Anses, 2020b)	BP n = 5 BP c = 0 LIM m = 100 cfu/g LIM M = 100 cfu/g (Règlement 2073/2005, 2005)
	staphylococcus aureus	Poudre de lait	Température <6°C ou > à 48°C pH <4 ou >10 Aw <0,83 NaCL > 20% D _{60°C} = 0,8 – 10 min D _{72°C} = 0,1 – 1 s (Anses, 2022a)	Aucune trace détectée dans 25g (Règlement 2073/2005, 2005)
	Staphylococcus coagulase	Poudre de lait, beurre		BP n = 5 BP c = 2 LIM m = 10 cfu/g LIM M = 100 cfu/g (Règlement 2073/2005, 2005)
	salmonella spp	Poudre de lait, oeufs en poudre, beurre	Température <5°C ou > à 50°C pH <3,8 ou >9,5 Aw <0,94 Lait en poudre : D _{85°C} = 87,9-137 s D _{100°C} = 43,6-51,4 s (Anses, 2021a)	Aucune trace détectée dans 25g (Règlement 2073/2005, 2005)

²¹ Fiche Technique Santé-Sécurité : Agents Pathogènes – Enterobacter spp. – Fiche technique | Agence de la santé publique du Canada. 19/04/2019. Gouvernement du Canada. Consulté le 23 juin 2023, <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/biosecurite-biosurete-laboratoire/fiches-techniques-sante-securite-agents-pathogenes-evaluation-risques/enterobacter.html>

Dangers		Contaminants	Conditions limites de développement / destruction	Niveau acceptable en sortie de production (produit réhydraté)
Classe	Nom			
	Bacillus cereus	Oeufs en poudre	Température <7°C ou > à 55°C pH <4,6 ou >9,3 Aw <0,92 NaCL > 10% D _{100°C} = 1,2-7,5 min (Anses, 2021b)	BP n = 5 BP c = 2 LIM m = 100 cfu/g LIM M = 1000 cfu/g (AFSCA, 2019, p. 2)
	Escherichia coli enterohémorragiques (EHEC)	Beurre	Température <6°C ou > à 45,5°C pH <4,4 ou >9 Aw <0,95 NaCL > 8,5% D _{60°C} (4) = 0,5 à 3 min et z (5) = 3,5 à 7°C (Anses, 2019)	BP n = 5 BP c = 2 LIM m = 10 cfu/g LIM M = 100 cfu/g (AFSCA, 2019, p. 2)
	Shigella	Personnel	Température <6°C ou > à 45,5°C pH <4,4 ou >9 Aw <0,95 NaCL > 8,5% D _{60°C} (4) = 0,5 à 3 min et z (5) = 3,5 à 7°C (Anses, 2019)	BP n = 5 BP c = 2 LIM m = 50 cfu/g LIM M = 500 cfu/g (AFSCA, 2019, p. 2)
	Clostridium perfringens	Personnel	Température <10°C ou > à 52°C pH <5 ou >8,3 Aw <0,95 NaCL > 6,5% D _{100°C} = 0,2 – 43 min D _{95°C} = 1,3 – 63 min z(5) : 10,6 à 13,7 C (Anses, 2017)	Ne doit pas excéder 100 000 ufc/g (CNA, 2009)
	Campylobacter	Personnel	Température <30°C ou > à 45°C pH <4,9 ou >9 Aw <0,987 NaCL > 2% D _{48°C} = 7,2 – 12,8 min ; D _{55°C} = 0,74 – 1 min (Anses, 2020c)	Aucune trace détectée dans 25g (AFSCA, 2019, p. 2)
	Shigatoxines (Escherichia Coli)	Personnel	Température <6°C ou > à 45,5°C pH <4,4 ou >9 Aw <0,95 NaCL > 8,5% D _{60°C} (4) = 0,5 à 3 min et z (5) = 3,5 à 7°C (Anses, 2019)	Aucune trace détectée dans 25g (Règlement 2073/2005, 2005)
Toxines bactériennes				

Dangers		Contaminants	Conditions limites de développement / destruction	Niveau acceptable en sortie de production (produit réhydraté)
Classe	Nom			
	enterotoxines (Staphylococcus / Clostridium perfringens)	Poudre de lait	Température <10°C ou > à 45°C pH <5 ou >9,6 Aw <0,86 NaCL > 10% Aéro-anérobie (Anses, 2022a)	Aucune trace détectée dans 25g (Règlement 2073/2005, 2005)
	Toxine diarrhéique	oeufs en poudre	Température <10°C ou > à 45°C pH <5 ou >9,6 Aw <0,86 NaCL > 10% Aéro-anérobie (Anses, 2022a)	Aucune trace détectée dans 25g (AFSCA, 2019, p. 2)
virus	Hépatite A	Personnel	Survie à -80°C 30j dans les selles à 24°C pH <3 ou >12 (Anses, 2011a)	Aucune trace détectée dans 25g (AFSCA, 2019, p. 2)
	Norovirus	Personnel	71°C – 1min 56°C – min (Anses, 2011b)	Aucune trace détectée dans 25g (AFSCA, 2019, p. 2)
Champignons - moisissures	Aspergillus spp. (aflatoxines, ochratoxine A)	Farines	Température <10°C ou > à 48°C pH <2,1 ou >11,2 Aw <0,78 (Anses, 2012)	N.D. : valeurs de références pour les mycotoxines
	Penicillium spp. (aflatoxines, ochratoxine A)	Farines, poudre de lait	Température <-6°C ou > à 35°C pH <2 ou >10 Aw <0,82 (Anses, 2022b)	
Métaux lourds	Plomb	Farines et lait en poudre	/	0,20 mg/kg (Règlement 1881/2006, 2006)
	Cadmium	Farines		0,15 mg/kg (Règlement 1881/2006, 2006)
	Toluène	produits d'entretien		Absence
	Xylène	produits d'entretien		Absence
	Méthanol	produits d'entretien		Absence
	Arsenic	Farine de riz uniquement		0,25 mg/kg (Règlement 1881/2006, 2006)
Mycotoxines	Aflatoxines M1	Farines	max 2 µg/kg max 5 µg/kg (farine de riz) (Règlement 1881/2006, 2006)	

Dangers		Contaminants	Conditions limites de développement / destruction	Niveau acceptable en sortie de production (produit réhydraté)
Classe	Nom			
	Aflatoxines B1	Lait en poudre		0,050 µg/kg (Règlement 1881/2006, 2006)
	Ochratoxine A	Farines		3,0 µg/kg (Règlement 1881/2006, 2006)
	Déoxynivalénol	Farines autre que riz		750 µg/kg (Règlement 1881/2006, 2006)
	Zéaralénone	Farines autre que riz		75 µg/kg (Règlement 1881/2006, 2006)
	Cheveux, ongles, boutons, pression, pansement, mégot	Personnel	/	Absence dans 1 kg
	Peinture, plâtre, poussière	Environnement		Absence dans 1 kg
	Plastique, verre, bois, métal	Matériel, environnement		Absence dans 1 kg

C. LIMITE DES RISQUES

Les risques de contaminations sont très limités grâce à une suite d'opération et de réglementation stricte. Tout d'abord des bonnes pratiques d'hygiène sont mises en place pour éviter les contaminations (lavage et désinfection des mains, charlotte, tenue vestimentaire propre, gants, lavage et désinfection des locaux, normes de stockage, respect de la marche en avant ...). De plus le produit aura une activité d'eau faible empêchant le développement de tout micro-organisme associée à une mise sous-vide. Les microalgues ne peuvent pas contaminer le produit en poudre car celles-ci, pour être consommée dans l'espace, doivent être axéniques. Dernièrement, le temps entre la préparation, la cuisson et la dégustation ne permet pas la croissance d'organismes.

IV. CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges (CDC) reprend l'ensemble des critères et des caractéristiques que le produit doit respecter. Il se base sur les 5S : sécurité, société, service, santé et satisfaction. Les 5 points suivants développent le raisonnement pour le choix des critères et leurs explications. Un tableau récapitulatif se trouve au point 1 de ce chapitre.

Certains critères sont directement en lien avec les critères ALISSE tel que le fait de ne pas rajouter d'eau dans la préparation, limiter les pertes de chaleur/énergie, la texture et la teneur en protéine des aliments pour atteindre des objectifs nutritionnels.

1. TABLEAU RÉCAPITULATIF

Tableau 11 : Récapitulatif du cahier des charges du Space Dessert

Critère	Objectifs	
Sécurité	Activité de l'eau	Entre 0,2 et 0,5
	Risques microbiologiques, physique, chimique	Aucun risque pour l'astronaute (valeurs cibles : Tableau 12, Tableau 13, Tableau 14).
	Production dans l'espace (réhydratation du produit, mélange, cuisson et dégustation)	Ne produit pas de miettes ou de perte d'éléments.
Société	Portionnement de la gaufre	1 portion facilement séparable en 2 ou 2 portions.
	Hydratation de la poudre	Avec de la spiruline
	Le poids total de la poudre apportée dans l'espace	Maximum 60% du poids total du produit réhydraté à la spiruline et cuit
	Genre de la spiruline	<i>Limnospira</i>
	Provenance des produits	Pays membre de l'ESA
	Informations sur l'emballage	Dénomination, DDM et un QR-code ou code-barre.
	Informations contenues dans le QR-code ou code-barre	Informations relatives au Règlement 1169/2011
Service	Poids total de la portion individuelle	<150 g
	Conservation (DDM)	6 mois
Santé	Macronutriments contenues dans 1 portions	>10 g de protéines Min 115 Kcal et max 200 Kcal
	Conservation (DDM)	6 mois
	Composition de la pâte à gaufre	>50% de spiruline
	Teneur en matière sèche de la spiruline	>20%
	Quantité de protéines apportées par la spiruline	>50% des protéines totales.
	Liste d'ingrédients autorisés	Farine de blé, farine de riz, sucre et produits sucrant, matières grasses, lait, œufs.

Critère	Objectifs
Additifs	Autorisé pour atteindre un objectif technologique non atteignable.
Satisfaction Score total de dégustation [STD]	[STD]produit fini à la spiruline ≤ [STD] produit équivalent réhydraté avec de l'eau × 1,15
Dureté (N) de la gaufre à base de spiruline fraîche	$G_{Cs} - 10\% < G_{Sf} < G_{Cs} + 10\%$
Masticabilité (N) de la gaufre à base de spiruline fraîche	$G_{Cs} - 10\% < G_{Sf} < G_{Cs} + 10\%$
Fracture (N) de la gaufre à base de spiruline fraîche	$G_{Cs} - 10\% < G_{Sf} < G_{Cs} + 10\%$
Objectif hédonique : « Est-ce que la gaufre à base de spiruline fraîche est différente d'une gaufre équivalente réhydratée à l'eau ? »	Indifférenciée à l'aveugle
Objectif hédonique : « Est-ce que la gaufre à base de spiruline fraîche est appréciée ? »	Oui
Profil aromatique	Exempt de molécule désagréable
Masse humide de la pâte à gaufre à base de spiruline fraîche	$G_{Cf} - 10\% < G_{Sf} < G_{Cf} + 10\%$
Perte de la masse hydrique à la cuisson	Maximum 15%
Forme du produit	Simple
Forme de l'emballage et/ ou du moule	Simple et cylindrique ou avec les bords arrondis

2. SÉCURITÉ

2.1. ACTIVITÉ DE L'EAU

L'activité de l'eau (A_w) est un paramètre important à prendre en compte, essentiellement pour les critères de conservation. La norme iso 18787 :2017 définit l'activité de l'eau comme « rapport de la pression partielle de vapeur d'eau en équilibre avec le produit analysé sur la pression saturante de vapeur d'eau en équilibre avec l'eau pure, à la même température » ; elle est exprimée dans Équation 3 et représentée dans la Figure 18²².

$$A_w = \frac{pF(T)}{P_s(T)}$$

Équation 3 : Formule de l' A_w

Avec $pF(T)$ la pression partielle de la vapeur d'eau en équilibre avec le produit analysé ; T la température ; $P_s(T)$ la pression saturante de la vapeur d'eau en équilibre avec l'eau pure.

²² ISO 18787:2017(fr) Produits agricoles et alimentaires — Détermination de l'activité de l'eau | 2017. ISO. Consulté le 08 janvier 2023, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18787:ed-1:v1:fr>

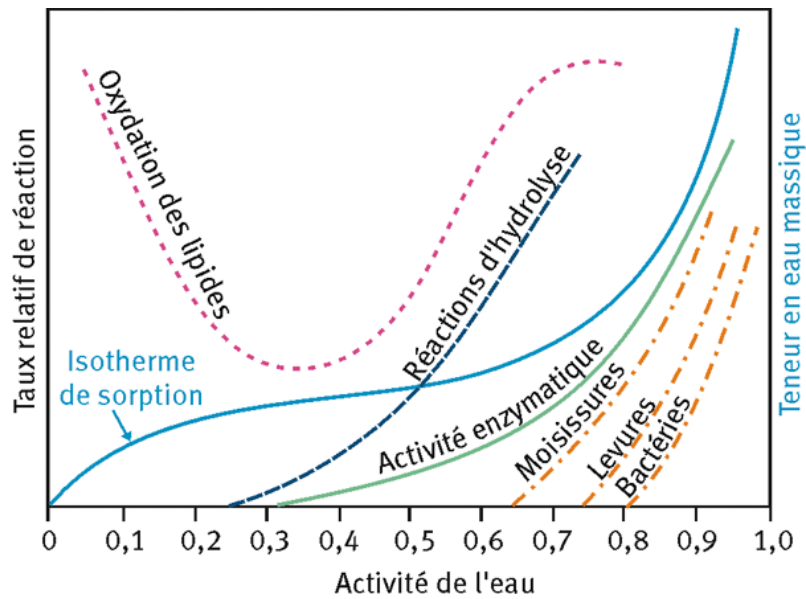


Figure 18 : Taux relatif des principaux agents de dégradation des matrices organiques en fonction de l' A_w (Baldet et al., 2012).

L'isotherme de sorption est également un paramètre intéressant pour la conservation, le transport et l'entreposage de l'aliment. En mesurant l'hygroscopicité de l'aliment, il sera possible de prédire les variations de la teneur en eau en fonction de l'environnement et de l'humidité qui s'y trouve (CASTAIGNE, 1992; Mavrou et al., 2018).

L' A_w de la farine de riz se situe entre 0,2 et 0,4 (Ahmed et al., 2018) ; celle du sucre brun varie entre 0,55 et 0,65 selon les méthodes de séchages utilisés (sa teneur en eau varie aux alentours de 3,5 et 4,2%) (Asikin et al., 2016) ; la poudre de lait entier possède une faible teneur en eau résiduelle de 2,5% et son A_w est de 0,2 pour un pH de 6,5 (Schuck, 2011) ; pour l'œuf en poudre, son A_w est de 0,17 pour une eau résiduelle nulle, de 0,47 lorsqu'elle contient 7-8% d'eau et de 0,64 avec 11-12% d'eau (Obara et al., 2006) ; Le beurre entier possède une activité de l'eau entre 0,91 et 0,99 (El-Hajjaji, 2022).

L'objectif en terme d'activité d'eau pour la poudre destinée à être envoyée dans l'espace se situe entre 0,2 et 0,5 avec un idéal de 0,3.

2.2. CARACTÉRISATION DES RISQUES

Les risques ont été décrits dans le chapitre III au point n°4 concernant la sécurité et la conservation. L'identification des dangers ainsi que leurs limites acceptables définies y sont décrites. Des tableaux récapitulatifs des limites acceptables sont repris ci-dessous pour les risques microbiologique, chimique et physique.

2.2.1. MICROBIOLOGIQUE

Tableau 12 : Limites microbiologiques acceptables pour le mélange de poudres

Danger	Limite
Escherichia coli producteurs de shigatoxines (STEC)	Aucune trace détectée dans 25g
Enterobacter spp.	BP n = 5 ; BP c = 2 ; LIM m = 10 cfu/g ; LIM M = 100 cfu/g
Listeria Monocytogenes	BP n = 5 ; BP c = 0 ; LIM m = 100 cfu/g ; LIM M = 100 cfu/g

Danger	Limite
staphylococcus aureus	Aucune trace détectée dans 25g
staphylococcus coagulase	BP n = 5 ; BP c = 2 ; LIM m = 10 cfu/g ; LIM M = 100 cfu/g
salmonella spp.	Aucune trace détectée dans 25g
Bacillus cereus	BP n = 5 ; BP c = 2 ; LIM m = 100 cfu/g ; LIM M = 1000 cfu/g
Escherichia coli enterohémorragiques (EHEC)	BP n = 5 ; BP c = 2 ; LIM m = 10 cfu/g ; LIM M = 100 cfu/g
Shigella	BP n = 5 ; BP c = 2 ; LIM m = 50 cfu/g ; LIM M = 500 cfu/g
Clostridium perfringens	Ne doit pas excéder 100 000 ufc/g
Campylobacter	Aucune trace détectée dans 25g
Shigatoxines (Escherichia Coli)	Aucune trace détectée dans 25g
enterotoxines (Staphylococcus / Clostridium perfringens)	Aucune trace détectée dans 25g
Toxine diarrhéique	Aucune trace détectée dans 25g
Hépatite A	Aucune trace détectée dans 25g
Norovirus	Aucune trace détectée dans 25g
Aspergillus spp. (aflatoxines, ochratoxine A)	N.D. : valeurs de références pour les mycotoxines
Penicillium spp. (aflatoxines, ochratoxine A)	

2.2.2. CHIMIQUE

Tableau 13 : Limites chimiques acceptables pour le mélange de poudres

Danger	Limite
Plomb	0,20 mg/kg
Cadmium	0,15 mg/kg
Toluène	Absence
Xylène	Absence
Méthanol	Absence
Arsenic	0,25 mg/kg
Aflatoxine M1	max 2 µg/kg max 5 µg/kg (farine de riz)
Aflatoxine B1	0,050 µg/kg
Ochratoxine A	3,0 µg/kg

Danger	Limite
Déoxynivalénol	750 µg/kg
Zéaralénone	75 µg/kg

2.2.3. PHYSIQUE

Tableau 14 : Limites physiques acceptables pour le mélange de poudres

Danger	Limite
Cheveux, ongles, boutons, pression, pansement, mégot	Absence dans 1 kg
Peinture, plâtre, poussière	Absence dans 1 kg
Plastique, verre, bois, métal	Absence dans 1 kg

2.2.4. PRODUCTION DANS L'ESPACE

Pour la production dans l'espace (réhydratation du produit, mélange, cuisson et dégustation), le dessert ne doit pas laisser sortir des éléments de l'emballages ou produire des miettes durant la dégustation.

3. SOCIÉTÉ

3.1. BESOINS DES ASTRONAUTES

L'aspect psychosocial de la vie spatiale est extrêmement important pour le bon déroulement des missions de plus ou moins longues durées. Cela passe également par l'alimentation. Le dessert préparé doit être partageable, c'est-à-dire qu'il doit contenir au moins 2 portions ou une portion divisible en 2 facilement.

Afin de répondre aux besoins des voyages spatiaux, un équilibre entre ce qui est importé depuis la terre et la partie produite dans l'espace doit être respecté. Dans le produit étudié, l'eau est incorporée via les microalgues cultivées sur place. Pour limiter le poids des aliments importés par navette, le poids total importé de l'aliment fini (eau comprise) ne doit pas excéder 60% du poids total (produit cuit). Cela permet également de respecter les critères ALISSE.

La partie liquide qui sert à hydrater le produit doit provenir uniquement de la spiruline fraîche du genre *Limnospira*, similaire à celle utilisée par le consortium MELISSA.

3.2. PROVENANCE DES PRODUITS

Les produits en poudre doivent provenir des pays membre de l'ESA : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, République Tchèque et Suisse²³. Ceci permet de garder une logique européenne et participe à l'économie de l'Europe à son échelle.

3.3. ETIQUETAGE

²³ L'ESA : faits et chiffres – Qui fait partie de l'ESA ? | N.D. ESA. Consulté le 24 juin 2023, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/L_ESA_faits_et_chiffres

Afin de limiter les informations sur l’emballage, seul la dénomination, la date de durabilité minimale et un QR-code ou un code-barre figure sur l’emballage.

Le code-barre ou le QR-code, lorsqu’il est scanné, renvoie aux informations concernant le produit. Ces informations contiennent a minima les informations demandées dans le Règlement 1169/2011 (2011) : Dénomination, liste des ingrédients, les allergènes, la quantité des ingrédients, quantité nette de la denrée alimentaire, la date de durabilité minimale, les conditions de conservation, les conditions d’utilisation, le numéro du lot, le nom ou la raison sociale et l’adresse de l’exploitant du secteur alimentaire, mode d’emploi, la déclaration nutritionnelle (Energie ; matière grasse ; acide gras saturés, glucides ; sucre ; protéines ; sel), langue : anglais.

4. SERVICE

4.1. CRITÈRES DE L’EMBALLAGE

Les critères liés au développement spécifique de l’emballage seront développés dans le cahier des charges fonctionnel au chapitre 1 sur les emballages p.121.

4.2. PORTIONS

Une portion est considérée comme la quantité nécessaire pour apporter minimum 10 g de protéines et maximum 200 Kcal. Ce dessert peut ainsi être consommé à la fin d’un repas et compléter l’apport en protéines et calories de astronautes, ou bien en post-effort pour maximiser l’anabolisme protéique. La portion individuelle ne peut excéder 150g de produit fini car une quantité supérieure risque d’être trop satiétogène et le consommateur ne terminera pas le produit au moment même, ce qui peut poser des problèmes de stockage et de conservation.

4.3. CONSERVATION

Les navettes de ravitaillement pour l’ISS arrivent en moyenne tous les 2 mois²⁴. Cependant pour des missions lunaires voir martiennes, l’attente entre deux cargaisons risquent de se rallonger grandement. C’est pourquoi la date de durabilité minimale (DDM) doit être supérieure à 6 mois.

5. SANTÉ

5.1. INGRÉDIENTS

Afin d’obtenir des produits enrichis en protéines fraîches, le produit doit être composé d’au moins 50% de microalgues contenant au minimum 20% de matière sèche. La spiruline fraîche doit également apporter au moins la moitié des protéines totales.

Les ingrédients principaux doivent être ceux utilisés pour réaliser une pâte à gaufre classique ; ces ingrédients peuvent avoir subi des procédés de transformations (séchage, lyophilisation, atomisation ...). Les ingrédients classiques sont : la farine de blé, le sucre et produits sucrants, matières grasses,

²⁴ ATV-3 : LE RAVITAILLEMENT DE L’ISS MADE IN EUROPE – Un service de livraison express | Charlotte Beskow. 10/08/2011. Centre National d’Études Spatiales. Consulté le 30 juin 2023, <https://cnes.fr/fr/web/CNES-fr/9973-gp-atv-3-le-ravitaillement-de-l-iss-made-in-europe.php>

lait, œufs . La farine de blé peut être remplacée par de la farine de riz car il s'agit d'une des plantes étudiées dans le projet MELISSA ; l'eau doit être fournie par les microalgues.

5.2. OBJECTIF NUTRITIONNEL

L'objectif est de compléter l'alimentation de l'astronaute en calories et protéines de qualité, à la fin d'un repas. Un objectif secondaire est de fournir une partie des protéines et des glucides après une séance de sport pour favoriser l'anabolisme musculaire. Une répartition commune des calories est 20-25% au petit déjeuner, 25-30% à midi, 15-20% au goûter et 20-25% au soir. Une portion doit apporter au **minimum 115 Kcal** pour fournir ¼ d'un repas représentant 20% de l'apport énergétique de celui-ci pour une femme ayant besoin de 2300 Kcal par jour.

En termes de protéines, comme expliqué dans la partie service, le produit fini doit apporter au moins 10g de protéines afin de contribuer de manière efficace à l'apport en acide aminés essentiels chez l'astronaute.

Il n'y a pas d'objectif spécifique pour les autres nutriments étant donné que la cuisson et les différents traitements peuvent détruire une partie de ceux-ci. L'objectif principal est de fournir de l'énergie et des protéines aux astronautes, l'objectif secondaire est d'évaluer à quelle hauteur les autres nutriments peuvent potentiellement contribuer aux besoins spécifiques du voyageur.

Le détail complet des données nutritionnelles doivent être fournies afin de calculer les apports de l'astronaute grâce aux compositions nutritionnelles des aliments et une évaluation des pertes lors de la cuisson du produit.

5.3. ADDITIFS

Des additifs peuvent être utilisés si cela s'avère nécessaire dans la formulation suite à l'impossibilité de respecter un autre critère. Des arômes pour augmenter le goût (tel que la vanilline couramment utilisée dans ce type de préparation) ; de la levure chimique afin de faire lever la pâte durant la cuisson.

6. SATISFACTION

6.1. OBJECTIF DE DÉGUSTATION

Le produit fini à base de spiruline doit avoir un score total de dégustation [STD], dans un panel, inférieur au [STD] du produit équivalent réhydraté avec de l'eau + 15% de ce score. La méthode de calcul du [STD] se trouve au chapitre VI. Réalisation du Space Dessert à la page 73.

Le score d'impression générale « lorsque je consomme le produit : je déteste, je n'aime pas, j'apprécie, j'aime, j'adore » doit être au moins apprécié par le panel.

Le score d'acceptabilité générale « Je pourrais en consommer : jamais, rarement, de temps en temps, souvent, tous les jours » doit être au moins « de temps en temps ».

$$[STD]_{\text{produit fini à la spiruline}} \leq [STD]_{\text{produit équivalent réhydraté avec de l'eau}} \times 1,15$$

6.2. TEXTUROMÉTRIE

La texture est définie par l'ISO 5492 :2008²⁵ comme :

"ensemble des propriétés mécaniques, géométriques, de surface et de corps d'un produit perceptibles par les récepteurs kinesthésiques ou somesthésiques et (le cas échéant) par les récepteurs visuels et auditifs depuis la première bouchée jusqu'à l'avale-ment final"

Dans le cas de la gaufre, les données de la dureté, de la masticabilité et de fracture vont être importantes. Les critères et leur définition sont repris dans le Tableau 15. [G_{Sf}] = gaufre à base de spiruline fraîche et [G_{Cs}] = gaufre à base de produits déshydratés.

Tableau 15 : paramètres texturométriques et leurs valeurs cible pour le cahier des charges

Paramètre	Description	Valeurs cibles
Dureté (N)	Résistance à la déformation due à une force, révélant la solidité de la structure du produit.	$G_{Cs} - 10\% < G_{Sf} < G_{Cs} + 10\%$
Masticabilité (N)	Evaluation de la facilité de mastication, considérant la cohésion et l'élasticité.	$G_{Cs} - 10\% < G_{Sf} < G_{Cs} + 10\%$
Fracture (N)	Analyse de la rupture de l'aliment sous contrainte.	$G_{Cs} - 10\% < G_{Sf} < G_{Cs} + 10\%$

6.3. CRITÈRES HÉDONIQUES

Etant donné la complexité de regrouper un panel d'astronautes, un test sur un panel représentatif de la population serait plus envisageable. Le test doit répondre aux questions « Est-ce que la gaufre à base de spiruline fraîche est différente d'une gaufre équivalente réhydratée à l'eau ? » et « Est-ce que la gaufre à base de spiruline fraîche est appréciée ? ». La gaufre à base de spiruline doit être indifférenciée de son équivalent sans spiruline et elle doit également être appréciée par le panel.

Ces tests doivent être complétés par une analyse d'arôme pour montrer que l'échantillon est exempt de molécules aromatiques désagréables. Le panel ne doit pas retrouver des odeurs de poulet / œufs / poissons et crustacés.

6.4. OBJECTIFS DE PRÉPARATION ET DE CUISSON

Lors de la préparation, la pâte à gaufre à base de spiruline doit être équivalente à son homologue sans spiruline. La masse humide ne peut pas dépasser $\pm 10\%$ de la masse humide de la recette de la pâte à gaufre maison.

Pour des raisons d'économie d'énergie, les pertes en eau doivent être minimisées et ne pas dépasser 15% à la cuisson du produit. Le procédé limitant au mieux les pertes en eau doit être privilégié pour être en concordance avec les critères ALISSE.

6.5. FORME DU PRODUIT FINI

Le mélange de poudre devra être dans un emballage le plus compact possible pour maximiser le poids/volume afin de limiter les coûts et la place disponible dans les cargos de ravitaillement. L'emballage doit cependant avoir une capacité plus grande que la contenance de la poudre pour

²⁵ ISO 5492 :2008 – Analyse sensorielle - vocabulaire | 2022. ISO. Consulté le 13 août 2023, <https://www.iso.org/fr/standard/38051.html>

pouvoir accueillir la spiruline. L'emballage et/ou le moule doivent avoir une forme simple, idéalement cylindrique ou avec les bords arrondis pour faciliter le nettoyage.

V. ANALYSE DE LA FINANÇABILITÉ

L'objectif de ce travail est de déterminer la faisabilité de la réalisation d'un dessert au sein de la station spatiale. Il s'agit d'un sujet de recherches et d'études ; il ne présente donc pas de prédispositions commerciales, même si toutefois, des produits à base de spiruline fraîche pourraient à terme voir le jour sur le marché. Ce chapitre est divisé en trois points ; tout d'abord un état des lieux du marché alimentaire spatial, ensuite, la cible et pour terminer les procédures à réaliser pour proposer un projet à l'ESA et recevoir des financements.

1. ETAT DES LIEUX DU MARCHÉ ALIMENTAIRE SPATIAL

Il existe de nombreuses agences spatiales ; cependant seulement 7 ont accès à une station spatiale ou exercent des vols habités (NASA, CNSA, ESA, CNES, ROSCOSMOS, JAXA et CSA)²⁶. Certaines possèdent leur propre laboratoire de recherches en alimentation comme la NASA et son *Space Food System Laboratory*²⁷. D'autres, comme l'ESA, font appel à des chercheurs dont le *Smart Gastronomy Lab* de Gembloux Agro-Bio Tech²⁸.

Des sociétés sont également engagées dans le milieu spatial alimentaire. Dans le rapport du marché global des recherches de l'alimentation spatiale 2022, les acteurs clés sont : *Nissin Foods, Morinaga Milk Industry, Onisi Foods, House Foods Corporation, Mitsui Norin, Mission : Space Food, The Space Foods Company, Space Food Laboratory, Space Foundation Discovery Center ; Astronaut Foods, Shanxi Shenzhou Space Food (Global Sp., 2022)*. Ceux-ci sont détaillés dans le Tableau 16.

D'autres moyens sont également mis en place pour pousser les acteurs à travailler sur des innovations alimentaires. Par exemple, l'ESA a demandé à deux entreprises (Alain Ducasse Formation et GEM) de réaliser des recettes pour des missions longues durées²⁹. De l'autre côté de l'Atlantique, la NASA et la CSA réalisent le *Deep Space Food Challenge* qui est un concours international pour financer et développer les projets les plus intéressants³⁰.

D'autres recherches sont réalisées sur les aliments frais, dont le projet MELISSA qui est un projet européen. Celui-ci est vaste, mais une partie consiste à produire de façon autonome des produits alimentaires comme des salades, tomates, céréales mais également des microalgues¹³. Le Tableau 16 reprend une liste non exhaustive des acteurs clés du marché alimentaire spatial.

Tableau 16 : Rôles des acteurs clés dans le marché alimentaire spatial et leurs produits proposés

Acteurs clés	Rôles	Type de produits / recherches
<i>Nissin Foods</i>	Entreprise agro-alimentaire	Plats préparés asiatiques (Ramen, nouilles, Riz sauce curry épicée, ragoût de riz au bœuf).
<i>Morinaga Industry</i>	<i>Milk</i> Entreprise agro-alimentaire	Poudre de lait nutritionnelle pour adulte.

²⁶ Liste des agences spatiales – liste des agences spatiales et les informations les concernant | 25/07/2022. Wikipédia. Consulté 13 décembre 2022, https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_agences_spatiales

²⁷ Space Food Systems – Présentation du laboratoire de recherche alimentaire de la NASA | Robert Lewis. 12/08/2022. NASA. Consulté le 13 décembre 2022, <https://www.nasa.gov/content/space-food-systems>

²⁸ Les menus spatiaux vont se mitonner à Gembloux – Article journalistique sur le Smart Gastronomy Lab | Christian Du Brulle. 14/03/2022. Daily Science. Consulté le 13 décembre 2022, https://dailyscience.be/14/03/2022/les-menus-spatiaux-vont-se-mitonner-a-gembloux/?fbclid=IwAR34ajbPoYt6AauhX1xKW9ZHxzhhW9L5_4fUYUA3Mr5dXsbVITAWaD2G7hw

²⁹ Ready for dinner on Mars? – Article de l'ESA Science & Exploration | 13/06/2005. ESA. Consulté le 13 décembre 2022, https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/Ready_for_dinner_on_Mars

³⁰ Deep Space Food Challenge – Concours d'innovations alimentaire organisé par la NASA et la CSA | 2021. Deep Space Food Challenge. Consulté le 13/12/2022, <https://www.deepspacefoodchallenge.org/>

Acteurs clés	Rôles	Type de produits / recherches
<i>Onishi Foods</i>	Entreprise agro-alimentaire	Plats préparés asiatiques à base de riz.
<i>House Foods Corporation</i>	Entreprise agro-alimentaire	Plats préparés asiatique (space curry).
<i>Mitsui Norin</i>	Entreprise agro-alimentaire	Thé vert, Thé Oolong.
<i>Mission : Space Food</i>	Entreprise d'innovation	Truffes en chocolat (Astreas) : Gagnant du Deep Space Food Challenge (NASA) Viande in-vitro (Aleph Farms).
<i>The Space Food Company</i>	Entreprise d'innovation	Gélules, gels, aliments solides, aliments texturés ...
<i>Space Food Laboratory</i>	Centre de recherche (NASA)	Aliments lyophilisés, packaging, boissons en poudre, biscuits, sucreries ...
<i>Space Foundation Discovery Center</i>	Centre de recherche	Lyophilisation, compléments alimentaires.
<i>Astronaut Foods</i>	Entreprise agro-alimentaire	Crème glacée lyophilisée, fruits lyophilisés.
<i>Shanxi Shenzhou Space Food</i>	Entreprise agro-alimentaire	Plats spécialités chinoises (tofu épicé, poissons...).
<i>Deep Space Food Challenge</i>	Concours d'innovation (NASA et CSA)	Aliments innovants.
<i>Projet MELISSA</i>	Centre de recherche (ESA)	Produits frais (fruits, légumes, céréales), bioréacteurs.

D'autres produits fabriqués sur Terre n'ont pas besoin de préparation spécifique pour l'espace, ils sont simplement mis dans un nouvel emballage afin d'assurer la qualité du produit.

2. CIBLES

Actuellement, la population cible est l'ensemble des astronautes séjournant dans l'ISS. Il est également possible d'imaginer que ce système soit exploitable sur des bases lunaire et martienne au vu de la demande d'innovations dans le secteur (Cooper et al., 2011). De façon fictive et totalement avant-gardiste, il est envisageable que les clients des futurs hôtels de tourisme spatial puissent être intéressés de consommer un aliment produit dans l'espace.

Ce ne sont cependant pas les astronautes qui choisissent les acteurs du marché alimentaire spatial mais essentiellement les agences spatiales. Dans un premier temps, ce projet se limitera à l'ESA car il est peu envisageable d'atteindre le marché russe, chinois ou japonais. Si le projet prend forme, il serait concevable de se tourner vers la NASA et la CSA.

3. RÔLE ET PROCÉDURES

Même si le produit étudié est destiné à l'utilisation des astronautes, ce ne sont pas ceux-ci qui décident de ce qui entre et sort de l'ISS. Ce sont les cadres des différentes agences spatiales qui valident s'il y a un véritable intérêt de recherche et développement (R&D) derrière le projet.

Au niveau de l'ESA, les petites et moyennes entreprises doivent s'enregistrer auprès de l'agence pour devenir soumissionnaires de celle-ci. Les étapes mentionnées dans la Figure 19 sont obligatoires³¹.



Figure 19 : ESA-STAR registration (source : ESA)

Ensuite, elles peuvent répondre à un appel d'offre ou soumettre un projet. Pour faire une proposition de projet, tout un travail doit être réalisé : les objectifs, l'état de l'art, les différents concepts, une analyse critique, une discussion sur les besoins ... Le projet sera soumis à l'ESA qui analysera la demande³².

Le programme de technologie de soutien général (GSTP) permet de financer différents projets innovants et des nouvelles technologies. Celui-ci se fait en 3 étapes : le développement, la production et la démonstration³³.

³¹ ESA-STAR registration process – procédure d'enregistrement des PME à l'ESA | 02/10/2020. ESA. Consulté le 14 décembre 2022, https://www.esa.int/About_Us/Business_with_ESA/How_to_do/esa-star_registration_process

³² Preparing a technical proposal – Article présentant les consignes pour proposer un projet | 17/10/2014. ESA. Consulté le 14 décembre 2022, https://www.esa.int/About_Us/Business_with_ESA/How_to_do/Preparing_a_technical_proposal

³³ About Directorate Technology Programmes – Informations sur les différents programmes de financement de projet de l'ESA | N.D. ESA. Consulté le 14 décembre 2022, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/About_Directorate_Technology_Programmes

VI. RÉALISATION DU SPACE DESSERT

1. INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est de déterminer la faisabilité de la conception d'un dessert en milieu spatial avec en partie des produits frais (dans ce cas, les microalgues). Ce dessert doit évidemment respecter de nombreuses contraintes tel qu'un apport suffisant en protéines, être en phase avec le projet MELISSA et les critères ALISSE, convenir au milieu atypique de l'espace etc. De nombreux produits à base de microalgues ont été développés à la suite de la demande populaire d'aliments santé, qui ont des intérêts nutritionnels pour l'humain ; des barres de céréales, des snacks, du pain, du yaourt, du lait fermenté, du kéfir, des pâtes, des biscuits, des sauces et des viandes enrichies en microalgues ont fait office de recherches. L'incorporation est cependant limitée à cause des arômes désagréables engendrés par le séchage de la bactérie. Il n'existe que très peu d'études sur les microalgues fraîches, et encore moins sur l'incorporation de celles-ci dans des aliments (Caporgno et al., 2018; Ferreira de Oliveira et al., 2022).

L'étude du cas de la gaufre a été choisie car, à la suite de recherches bibliographiques, il est apparu que celle-ci pouvait avoir un certain potentiel compte tenu de toutes les exigences à respecter.

RÉALISATION D'UNE PREUVE DE CONCEPT

En amont des expérimentations visant à la formulation et la détermination d'un procédé de fabrication de gaufres à la biomasse fraîche microbienne en conditions spatiales, une première étape a consisté, d'une part, à caractériser la biomasse et à se familiariser avec cette matière première et d'autre part à se familiariser avec la formulation et la cuisson de gaufres et à étudier l'effet des différents ingrédients sur les caractéristiques physico-chimiques et organoleptiques du produit. Quatre essais distincts ont été réalisés, chacun sans être répété trois fois comme prévu dans un protocole standard.

PREMIER ESSAI

Une première formulation basée sur une recette traditionnelle de gaufres a été réalisée et est constituée de 80 g de farine de blé, un œuf, 12,5 g de sucre, 8 g de beurre et 100 g de lait.

Une seconde variation de cette recette classique a été élaborée, dans laquelle le lait a été substitué par 8,5 g de poudre de lait écrémé et 30 g de spiruline en poudre.

Une troisième formulation a été élaborée en utilisant de la spiruline fraîche provenant de la ferme ETIKA (140 g de biomasse fraîche) avec ajustement de la matière sèche.

Les trois formulations ont ensuite été soumises à des cuissons distinctes, à savoir au moyen d'un gaufrier classique ainsi qu'au micro-ondes (Comme illustré dans la Figure 20). Au cours des investigations, des disparités marquées en termes de texture ont été observées, mais la divergence la plus significative résidait dans le domaine gustatif. La gaufre à base de spiruline sèche s'est révélée inconvenante à la consommation en raison d'odeurs d'aliments pour poissons. En revanche, la formulation à base de spiruline fraîche dégage une odeur moins désagréable et engendre une légère amertume quelques instants après avoir été dégustée.



Figure 20 : premier essai de l'incorporation de spiruline sèche et fraîche dans la pâte à gaufre

SECOND ESSAI

Le second essai a été réalisé afin de comparer la méthode de préparation en utilisant la même formulation de gaufre classique qu'à l'essai 1 et en appliquant une cuisson au gaufrier. Une première version a été réalisée manuellement en incorporant les ingrédients un par un et une seconde en mixant tous les ingrédients ensemble. Une cuisson au gaufrier a été appliquée dans les deux cas avec les mêmes paramètres. Dans le premier cas, la gaufre était trop cuite et dans le second la gaufre n'était pas assez cuite (Figure 21).



Figure 21 : différence de cuisson entre une gaufre préparée manuellement (au-dessus) et une gaufre préparée à l'aide d'un mixeur (en-dessous)

TROISIÈME ESSAI

Le 3eme essai avait pour objectif de déterminer l'influence de la quantité de sucre et de la présence de levure chimique sur la formulation de la gaufre. Des gaufres à base de farine de riz ont été réalisées au gaufrier et au micro-onde (à différentes puissances) avec/sans spiruline, avec/sans sucre et avec/sans levure chimique. Similairement à l'étude de Magehay et al. (2005), il a été observé que plus la puissance du micro-onde est élevée, plus le volume final augmente. D'autre part, la levure chimique et le sucre influencent positivement la cuisson et la couleur de la gaufre.

QUATRIÈME ESSAI

Le dernier essai a permis de comparer la farine de blé et la farine de riz avec et sans levure chimique avec une cuisson au gaufrier. Il a été observé que la levure permettait d'obtenir une meilleur homogénéité de la cuisson et les résultats gustatifs étaient en faveur des gaufres à base de farine de riz.

Bien que les données collectées dans ces 4 essais ne possèdent pas de validité scientifique à proprement parler, elles ont toutefois joué un rôle dans l'établissement du protocole expérimental qui a guidé ce travail (Figure 22).

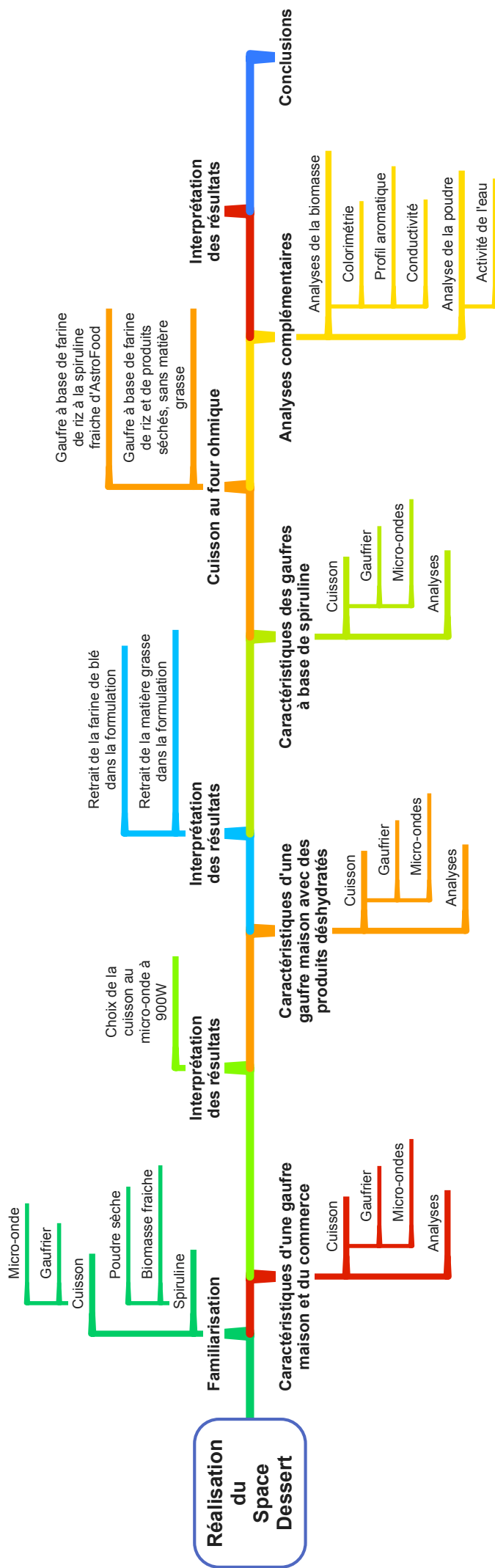


Figure 22 : Protocole expérimentale de la conception du Space Dessert

DÉVELOPPEMENT DU SPACE DESSERT

La première phase du projet a consisté à définir les analyses à effectuer tout au long du travail. L'objectif était de répondre aux exigences du cahier des charges et de comparer les résultats. Pour chaque échantillon, une liste de mesures a été établie, lesquelles devaient être prises pendant les différentes étapes de production : la masse avant et après cuisson, la température à la fin de la cuisson, la hauteur du produit avant et après cuisson, la masse volumique, ainsi que des évaluations sensorielles et de la texture. En outre, des tests additionnels ont été menés pour évaluer la couleur, l'activité de l'eau et le profil aromatique sur certains échantillons.

Une fois le plan d'expérience établi, des gaufres maison ont été préparées, à la fois avec un gaufrier et au four à micro-ondes en utilisant des ingrédients frais. Les résultats obtenus ont permis de déterminer la méthode optimale de cuisson pour le four à micro-ondes. Avec ces paramètres en main, l'adaptation de la recette en utilisant des ingrédients déshydratés tout en maintenant un taux d'humidité équivalent a été réalisée. Différentes matières grasses ont également été testées lors de la production. Cependant, les différences observées avec ou sans matière grasse étaient minimes. Dans le but de simplifier le processus de production, il a été décidé de retirer la matière grasse des ingrédients. Une observation intéressante a été faite en faveur de la farine de riz par rapport à la farine de blé, ce qui a conduit à exclure la farine de blé pour les étapes suivantes. Ces tests ont été réalisés uniquement avec le gaufrier et le four à micro-ondes, car le four ohmique avait du retard dans sa livraison. Il a été décidé de poursuivre en se basant sur ces résultats.

Ces étapes précédentes ont fourni des critères à suivre pour la production de gaufres à base de spiruline fraîche. La production à continuer à être réalisée en utilisant à la fois le four à micro-ondes et le gaufrier, en comparant deux types de biomasse. Les résultats ont montré que la spiruline de la société AstroFood était plus favorable. En attendant la mise en place du four ohmique, des tests supplémentaires pour caractériser les biomasses et certains échantillons ont été entrepris. Ensuite, la production de gaufres avec le four ohmique a pu être effectuée, en analysant les gaufres à base de produits déshydratés et celles à base de spiruline fraîche fournie par AstroFood. Les analyses subséquentes ont permis de déterminer les paramètres optimaux de cuisson pour les gaufres avec le four ohmique.

L'analyse de l'ensemble de ces résultats a permis de déterminer la faisabilité du projet, ses avantages et inconvénients, ainsi que les lacunes de l'étude et les opportunités d'amélioration, tout en suggérant les perspectives futures.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. DÉNOMINATION DES ÉCHANTILLONS

Les échantillons ont été nommés suivant le Tableau 17 ci-dessous. Tous les échantillons possèdent au moins les 3 premières abréviations. Les abréviations sont séparées par un point, à l'exception du type de modification où il n'y a pas de point avant le hashtag. A titre d'exemple pour une gaufre à base de spiruline fraîche, de farine de blé cuite au four ohmique à 150V avec la spiruline d'Etika, l'abréviation sera « Sf.B.OH.V1.5#Set ». Lors des tests en triplicat, un numéro précédé d'un point est également ajouté : « Sf.B.OH.V1.5#Set.1 », « Sf.B.OH.V1.5#Set.2 », « Sf.B.OH.V1.5#Set.3 ».

Tableau 17 : tableau explicatif des noms des échantillons

Type de produit		Farine utilisée		Type de cuisson		Paramètre de cuisson		Type de modification	
Commerce	Com	Blé	B	Gaufrier	G			Beurre	#B
Produits frais	Cf	Riz	R	Ohmique	OH	100V	V1	Mycryo	#Mi
Produits séchés	Cs					150V	V1.5	Sans matière grasse	#SMG
Spiruline fraîche	Sf					200V	V2	Sf Etika	#Set
Spiruline sèche	Ss			μ-onde	MW	900W	9	Sf Astrofood	#Sas
						600W	6	Sf Astrofood	#Sas2
						450W	4	Ss Etika	#SsEt
								Moule 8*10g	#Plat

Pour la cuisson au gaufrier, les paramètres de cuisson ne sont jamais modifiés d'un échantillon à un autre, ils n'ont donc pas été précisés. Pour la cuisson micro-ondes, lorsqu'il n'est pas indiqué de paramètre de cuisson, il s'agit systématiquement de la cuisson à 900W.

Lorsqu'un produit contient de la spiruline fraîche ou sèche, les autres ingrédients sont de facto sous leur forme sèche à l'exception de l'eau ajoutée à la spiruline sèche. Lorsque le moule présentant 8 empreintes pouvant contenir 10g de matière a été utilisé à la place des 3 moules de ±27 g (méthode de cuisson de référence choisie) la mention 8*10g a été spécifiée.

Au niveau des matières grasses, le beurre a été systématiquement utilisé avec les produits frais. La nature des matières grasses (beurre, mycrio et sans matières grasses) ne varie que pour les préparations à base de produits séchés, tandis que les gaufres à base de spiruline ne contiennent pas de matière grasse ajoutée tel que du beurre ou de l'huile.

La modification #Sas2 doit être différenciée de la modification #Sas. En effet, les deux modifications contiennent la même spiruline mais la quantité est plus élevée pour #Sas2 afin d'obtenir une masse humide de la pâte plus élevée.

2.2. INGRÉDIENTS

Les ingrédients utilisés pour réaliser les tests sont référencés dans le Tableau 18. Certains produits n'ont été utilisés que sur peu d'essais. La farine de riz de la marque Markal n'a été utilisée que pour les premiers essais et pour les gaufres classiques réalisées avec des produits frais.

Tableau 18 : Références des ingrédients utilisés pour la réalisation des essais

<u>Produit</u>	<u>Référence</u>	<u>Marque</u>	<u>Conditionnement</u>	<u>Origine</u>
Farine de blé	Farine pour pâtisserie	Soubry	1kg en sachet papier cartonné	Grande surface belge
Farine de riz	Farine de riz blanc bio	Markal	500g en sachet plastique fermé hermétiquement	Kissplanet
	Farine de riz blanc bio	Boni	500g en sachet plastique fermé hermétiquement	Colruyt
lait entier	Lait entier	Paturages	Bouteille en plastique 1L	Grande surface belge
œufs entiers	Œufs solidaires	Boni sélection	Boite carton 10 œufs	Colruyt
sucre roux	Cassoande Graeffe	Tirlemont	500g en papier cartonné	Grande surface belge
levure chimique	Backin poudre à lever	Dr Oetker	Sachet de 16g	Grande surface belge

lait entier en poudre	Lait entier en poudre	Emergency food by TREK'N EAT	Conserve de 650g	lyophilise.fr
Œufs entiers en poudre	Œuf de poule entier en poudre élevé au sol	Emergency food by TREK'N EAT	Conserve de 270g	lyophilise.fr
Beurre	Beurre de laiterie - non salé	Everyday	Papier 250g	Colruyt
Mycryo	Mycryo - Beurre de cacao en poudre	Callebaut	Pot de 0,6Kg	Magasin spécialisé
Spiruline fraîche	Spiruline Glacée	Etika Spirulina	Plastique congelée fermé hermétiquement 70g	Etika France Villeneuve d'Ascq
	Spiruline surgelée	AstroFood	Sachet hermétique 1 ou 2 kg	Astrofood
Spiruline sèche	Spiruline sèche	Etika Spirulina	Sachet cartonné fermé hermétiquement	Etika France Villeneuve d'Ascq
Gaufre du commerce	Gaufre cœurs	Les galettes d'Aubel	±345g pour 5 pièces en emballage plastique.	Grande surface belge
Eau	Robinet			

2.3. FORMULATION DES GAUFRES

Les gaufres du commerce (Com) sont composées de farine de froment, beurre, huile de grasse végétales (colza et palme), sucre, œufs, lait UHT, sel, vanilline.

Toutes les préparations ont été réalisées pour obtenir un appareil de ±280g afin de pouvoir réaliser 3 cuissons de ±80g.

Les gaufres à base de produits frais ont été réalisées à l'aide de la formulation reprise au Tableau 19. Il s'agit de la recette de référence. La masse humide (MH) du produit est de 48,76% pour la recette à base de farine de blé et de 48,79% pour celle à base de farine de riz. L'objectif a été de garder une MH se situant entre 48 et 50% du produit pour l'appareil. Ces données, calculées grâce à la masse hydrique des produits, sont résumées dans le Tableau 20 et l'Équation 4.

$$\text{Pourcentage de la MH} = \frac{Mi_1 \times MHi_1 + Mi_2 \times MHi_2 + Mi_3 \times MHi_3 \dots}{\sum Mi_n} \times 100$$

Équation 4 : calcul de la masse humide total d'un produit

Mi est la masse de l'ingrédient et MHi est la masse humide de l'ingrédient.

Tableau 19 : quantités des ingrédients pour une gaufre classique maison

<u>Farines</u>	<u>Lait entier</u>	<u>Œufs entiers</u>	<u>Sucre roux</u>	<u>Beurre</u>	<u>Levure chimique</u>
80 g	100 g	50 g	40 g	10 g	0,5 g

Tableau 20 : masse humide des ingrédients utilisés dans la préparation des gaufres (Référence : ciqual.anses.fr)

<u>Dénomination</u>	<u>MH%</u>
Farine de blé (g)	11,30%
Farine de riz (g)	11,40%
lait entier (g)	87,50%
œufs entiers (g)	76,30%
sucre roux (g)	1,31%
levure chimique (g)	5,40%
lait entier en poudre (g)	2,40%
Œufs entiers en poudre (g)	3,39%
Beurre (g)	15,40%
Mycryo (g)	0,00%
Spiruline fraîche Etika (g)	77,30%
Spiruline fraîche AstroFood (g)	90,15%
Spiruline sèche Etika (g)	4,68%
Eau (g)	100,00%

Pour la recette à base de produits secs, une proportion afin de garder le même pourcentage de matière sèche que pour la version constituée de produits frais, a été réalisée. Pour ce faire, l'Équation 5 a été utilisée, dont "e" représente le produit entier et "s" le même produit séché.

$$\text{Produit équivalent sec} = (Mi_e - Mi_e \times MHi_e) + \frac{Mi_e - Mi_e \times MHi_e}{(1 - MHi_s) \times MHi_s}$$

Équation 5 : formule d'équivalence d'un produit sec sur base d'un produit entier

Grâce à cette équation, une recette équivalente à celle reprise au Tableau 19 a été formulée et reprise au Tableau 21 et les formulations de gaufres à base de spiruline dans le Tableau 22. La recette Astrofood2 possède une masse humide plus élevée (54,67%) comparée à toutes les autres qui se situent entre 48% et 50%.

Tableau 21 : quantités des ingrédients pour une gaufre à base de produits secs

	Farines	Lait en poudre	Œufs en poudre	Sucre roux	Matière grasse	Levure chimique	Eau
Beurre	80 g	12,81 g	12,27 g	40 g	10 g	0,5 g	125 g
Mycryo	80 g	12,81 g	12,27 g	40 g	10 g	0,5 g	130 g
SMG	80 g	12,81 g	12,27 g	40 g	/	0,5 g	120 g

Tableau 22 : quantités des ingrédients pour une gaufre à base de spiruline

	Farines	Lait en poudre	Œufs en poudre	Sucre roux	Levure chimique	Spiruline
Etika	80 g	12,81 g	12,27 g	40 g	0,5 g	210 g
Astrofood	80 g	12,81 g	12,27 g	40 g	0,5 g	150 g
Astrofood2	80 g	12,81 g	12,27 g	40 g	0,5 g	195 g

2.4. MÉTHODE DE PRÉPARATION

3 modes de préparation ont été utilisés en fonction des types de préparation :

- A) Les gaufres classiques faites maisons ont été réalisées manuellement.
 - a. Séparer le blanc du jaune d'œuf.
 - b. Faire mousser le sucre et le jaune d'œuf à l'aide d'un fouet.
 - c. Ajouter le beurre ramolli et travailler pour avoir une mousse onctueuse et blanche au fouet.
 - d. Ajouter le lait et mélanger jusqu'à homogénéisation au fouet.
 - e. Saupoudrer la farine et la levure chimique et l'incorporer délicatement à la pâte à la cuillère.
 - f. Fouetter les blancs en neige et les incorporer délicatement à la spatule.
- B) Pour les gaufres à base de produits secs, les ingrédients ont été pesés individuellement et ajoutés dans un sac sous-vide de 19,6 cm sur 14,8 cm. L'eau est ajoutée en dernière minute juste avant de mettre sous vide partiel jusqu'à 0,6 bar à l'aide d'une sous-videuse (Original Henkelman Vacuum Systems modèle Jumbo 42 230V, 16m³/h, 0,6kW). Le sac est mélangé à la main pendant 5 minutes jusqu'à homogénéisation.
- C) Les gaufres à base de spiruline sont préparées de manière identique concernant les pesées des ingrédients secs. La spiruline fraîche est ensuite ajoutée dans le sac après avoir subi une étape de décongélation au bain-marie ($\pm 30^{\circ}\text{C}$). Une fois la mise sous vide partielle réalisée, le produit est mélangé à l'aide d'un stomacher (Seward BA6021 Stomacher Lab-Blender 400 230/250V, 50Hz, 95W) afin d'automatiser cette étape. Le stomacher mélange le produit pendant 2 minutes par mouvements péristaltiques, le sachet est ensuite tourné de 90° et est replacé dans le stomacher pendant 2 minutes afin que le mélange soit bien homogène.

2.5. MÉTHODES DE CUISSON

3 méthodes de cuisson ont été réalisées. Pour la cuisson micro-ondes et la cuisson ohmique, plusieurs paramètres ont été testés. Les abréviations spécifiques utilisées pour les différentes modalités de cuisson sont reprises au paragraphe 2.1 (page 64). Ces modalités sont résumées dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Récapitulatif des méthode de cuisson

Matériel	Spécification dans l'échantillonnage	paramètres
Gaufrier	Aucun	4 minutes – puissance 3
Four micro-ondes	Aucun	2 minutes – 900W
	900W	2 minutes – 900W
	600W	2 minutes – 600W
	450W	2 minutes – 450W
Four ohmique	100V	8 minutes – 100V
	150V	3 minutes – 150V
	200V	1 minutes et 25 secondes – 200V

2.5.1. CUISSON CLASSIQUE AU GAUFRIER

La cuisson classique est réalisée à l'aide d'un gaufrier de type galette. Il s'agit du Waffle Maker SWE 1200 A1 de SilverCrest 220-240V / $\sim 50\text{Hz}$ / 1200W. 4 niveaux de température sont programmés sur

l'appareil ; les gaufres ont cuits pendant 4 minutes, à la puissance 3. La puissance 3 permet d'atteindre les températures mesurées dans la Figure 23 : rouge = $159,3 \pm 19,9^{\circ}\text{C}$; vert = $154,9 \pm 12,7^{\circ}\text{C}$; bleu = $153,9 \pm 14,0^{\circ}\text{C}$. La température moyenne du gaufrier à cette puissance correspond à $156,0 \pm 14,0^{\circ}\text{C}$; ces températures ont été mesurées à l'aide du thermomètre infrarouge testo 104-IR décrit au point 2.6.2. Lors de la cuisson, l'appareil chauffe à vide pour atteindre la température de cuisson. Un pâton de $\pm 80\text{g}$ est étalé de manière plus ou moins homogène sur l'appareil avant d'être refermé. Une fois la cuisson terminée, la gaufre a délicatement été retirée et séchée sur une grille. Entre deux cuissons, l'appareil est fermé, à vide, pour atteindre de nouveau la température de cuisson.

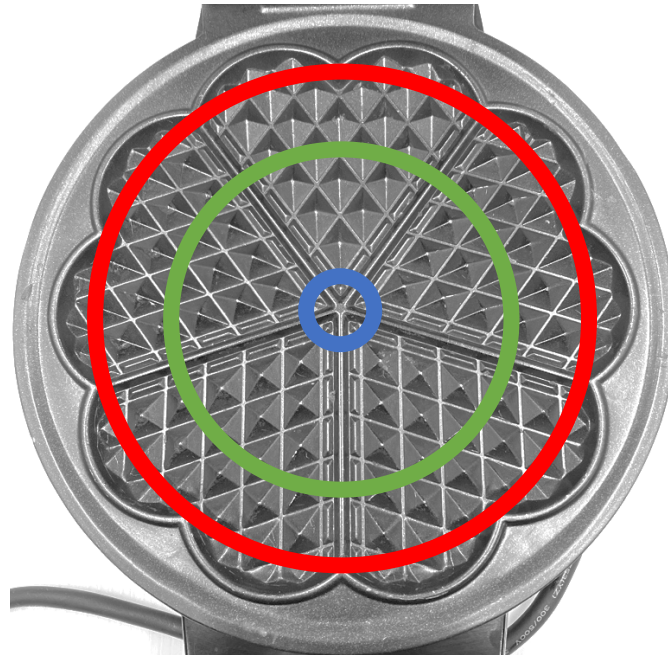


Figure 23 : températures mesurées à la puissance 3 du gaufrier Waffle Maker SWE 1200 A1 de SilverCrest (rouge = $159,3 \pm 19,9^{\circ}\text{C}$; vert = $154,9 \pm 12,7^{\circ}\text{C}$; Bleu = $153,9 \pm 14,0^{\circ}\text{C}$).

1.5.2. CUISSON AU FOUR À MICRO-ONDES

La cuisson au micro-ondes a été réalisée à l'aide du four à micro-ondes Samsung modèle MG28F303TAK, alimentation 230V ~ 50Hz CA, puissance de sortie 100W à 900W (6 niveaux), fréquence de fonctionnement 2450MHz. Des cuissons à des puissances de 900W (100%), 600W (67%) et 450W (50%) ont été testées. La durée de cuisson est toujours fixée à 2 minutes, quelle que soit la puissance appliquée. D'après Al-Muhtaseb (2010; Pan-utai et al., 2023) une charge d'eau supplémentaire dans le micro-ondes permet au magnétron de ne pas surchauffer, surtout lorsque le produit atteint un niveau d'humidité bas ; la meilleure méthode de cuisson pour obtenir une cuisson homogène est de placer la pâte au milieu et la charge d'eau sur le bord du verre tournant (Figure 24). Le dispositif utilisé est un moule Silikomart SF022 possédant 11 empreintes. Les 3 empreintes centrales ont été remplies avec $\pm 26\text{g}$ de pâte à gaufre. Une cuisson remplissant les 4 moulages supérieurs et inférieurs a été réalisé ($8^* \pm 10\text{g}$ ou #Plat dans les abréviations). Une empreinte possède un diamètre de 50mm et une hauteur de 30mm.

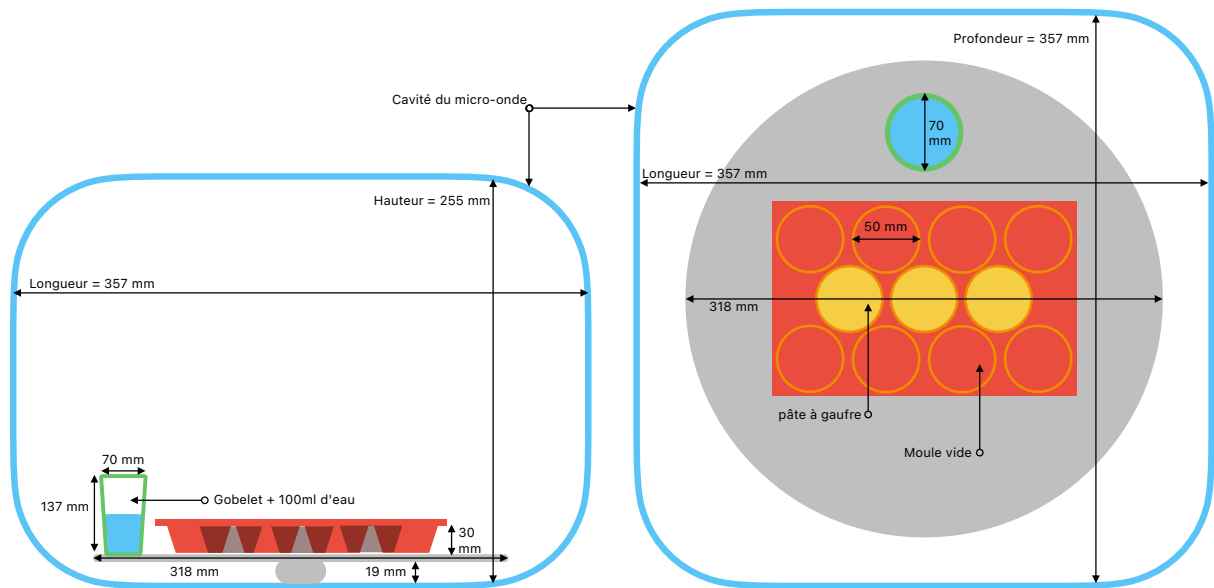


Figure 24 : Schéma expérimental de la cuisson au micro-ondes (dimensions en mm).

2.5.2. CUISSON AU FOUR OHMIQUE

La cuisson ohmique a été réalisée à l'aide d'un four ohmique de la firme « emmepiemme berma » équipé d'une alimentation standard de 230 V 50 Hz. Des cuissons à des tensions de 100V (14,3 V/cm), 150V (21,4 V/cm) et 200V (28,6 V/cm) ont été appliquées afin de déterminer la méthode de cuisson optimale. Les mesures de température (thermomètre testp 104-IR sonde de pénétration) et de conductivité (capteurs internes au four) des gaufres ont été enregistrées avant, pendant et après chaque cycle de cuisson et les durées de cuisson appliquées sont les suivantes : 8 minutes, 3 minutes et 1 minute et 25 secondes pour les tensions de 100V, 150V et 200V respectivement. Le coefficient K du tuyau en polycarbonate utilisé est de 3.63, représentant le rapport entre la surface du tuyau et sa longueur (hauteur = 7cm ; diamètre = 5,35 cm). (Figure 25). ±80 g de pâte est placé dans la cellule par cuisson.

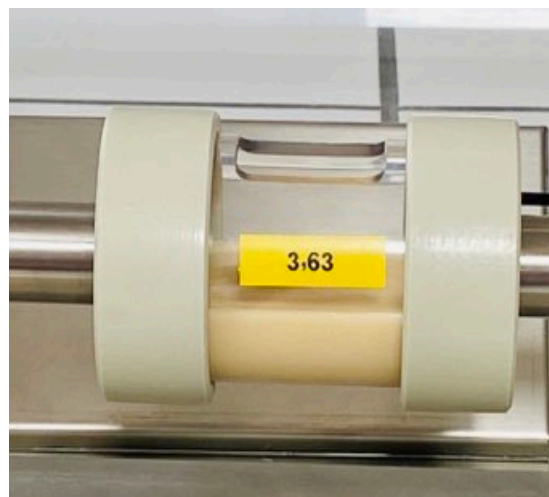


Figure 25 : Cellule de cuisson (tuyau en polycarbonate)

2.6. CARACTÉRISATION DES CUISSONS

2.6.1. IMPACT DE LA CUISSON SUR LA MASSE DU PRODUIT

Les mesures de poids ont été réalisées à l'aide d'une balance Ohaus Navigator NV3202 ayant une précision de 0,02 g et une résolution $1 \cdot 10^{-2}$ g. La masse avant (M_i) et après la cuisson (M_c) de chaque échantillon a été mesurée. Cela a permis de calculer le pourcentage de réduction de la masse.

$$\% \text{ réduction de masse} = \left(1 - \frac{M_c}{M_i}\right) \times 100$$

Équation 6 : Pourcentage de réduction de la masse après la cuisson d'un échantillon

2.6.2. TEMPÉRATURE

La température a été mesurée à l'aide d'un thermomètre avec sonde de pénétration et capteur infrarouge testo 104-IR ayant une précision de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ entre -30 et $+99,9^\circ\text{C}$ et une résolution de $1 \cdot 10^{-1}$ $^\circ\text{C}$. Étant donné l'impossibilité de mesurer la température au sein du gaufrier, du micro-ondes ou du four ohmique avec les outils à disposition, la sonde a été introduite dans l'aliment directement à la fin de la cuisson. La température a été mesurée au niveau de la ligne rouge dans la Figure 26 en fonction des modes de cuisson des échantillons (de gauche à droite : gaufrier, four à micro-ondes, four ohmique).

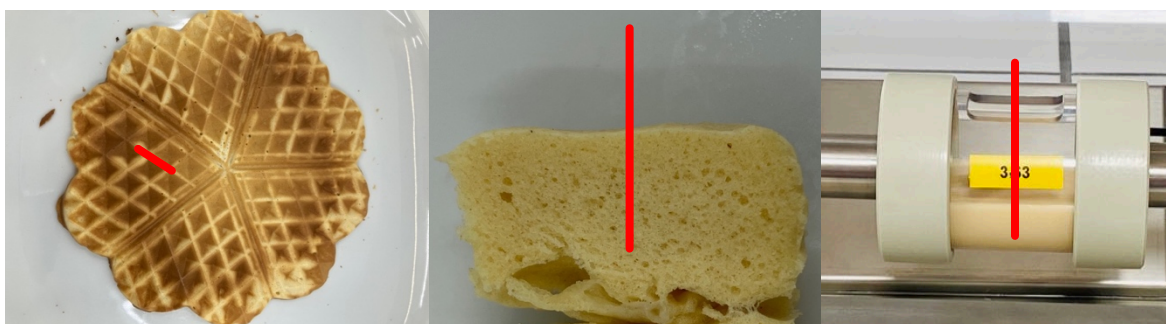


Figure 26 : emplacement de la pénétration de la sonde pour la mesure de la température des échantillons au gaufrier, four à micro-ondes et four ohmique de gauche à droite.

Pour le four ohmique, la température a été relevée avant, pendant et après la cuisson, directement dans la cellule. Le courant a été interrompu pour la prise de la température à différents temps de cuisson afin de mesurer une cinétique de chauffe.

2.6.3. MÉTRIQUES ET MASSE VOLUMIQUE

Des mesures ont été prises à l'aide d'un pied à coulisse (Figure 27).

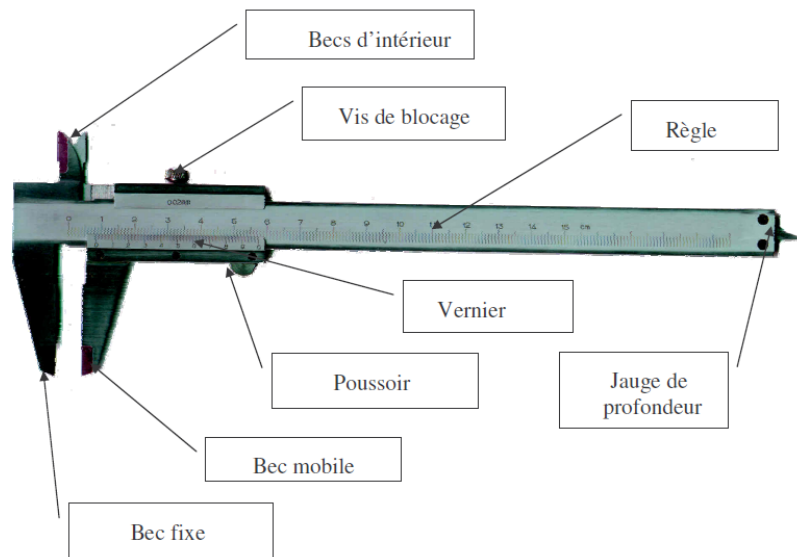


Figure 27 : Schéma du pied à coulisse³⁴

HAUTEUR DU PRODUIT AVANT LA CUISSON

Cuisson classique au gaufrier

La mesure est impossible dans le moule

Cuisson au four à micro-ondes

La mesure a été réalisée dans le moule, à plat à l'aide de la jauge de profondeur. Un échantillon complet possède 9 mesures de hauteur.

Cuisson au four ohmique

la mesure de hauteur a été effectuée dans la cellule de cuisson, en utilisant une jauge de profondeur. Un échantillon complet comporte 3 mesures de hauteur

HAUTEUR DU PRODUIT AVANT LA CUISSON

Cuisson classique au gaufrier

La hauteur a été mesurée à plat, à 3 endroits différents de chaque gaufre à l'aide de la jauge de profondeur. La mesure a été réalisée au croisement de 2 arêtes (point le plus haut de la gaufre) sur 3 cœurs différents. Un échantillon complet possède 9 mesures de hauteur.

Cuisson au four à micro-ondes

La hauteur a été mesurée entre le point le plus haut et la base de chaque échantillon entre le bec fixe et le bec mobile. Chaque échantillon complet possède 9 mesures de hauteur.

Cuisson au four ohmique

La hauteur a été mesurée entre le point le plus haut et la base de chaque échantillon entre le bec fixe et le bec mobile. Chaque échantillon complet possède 3 mesures de hauteur.

MASSE VOLUMIQUE

³⁴ MECA ZÉRO – COURS & INFOS SUR LA MÉCANIQUE – Pied à coulisse | 28/12/2016. Meca0. Consulté le 8 août 2016, <https://meca0.wordpress.com/2016/12/28/pied-a-coulisse/>

La masse volumique des échantillons a été mesurée en découpant un parallélépipède rectangle par échantillon au couteau. Les mesures ont été réalisées entre le bec fixe et le bec mobile du pied à coulisse. La masse de l'échantillon (M_{PR}) a été divisée par son volume comme indiqué dans l'Équation 7. Chaque échantillon complet possède 3 mesures de masse volumique.

$$\text{Masse volumique (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{PR}}{L \times l \times h}$$

Équation 7 : Masse volumique des échantillons

2.6.4. SCORE TOTAL DE DÉGUSTATION

Un questionnaire de dégustation personnel des échantillons a été réalisé (Annexe III) ; celui-ci permet d'obtenir une classification subjective des différents échantillons grâce au score total de dégustation [STD] : Les scores sont calculés sur l'apparence (couleur [A_C], cuisson de la pâte [A_P] et homogénéité de la pâte [A_H]), la texture (tendreté [T_T], élasticité [T_E], densité [T_D], friabilité [T_F]) et la saveur (sucré [S_S], salé [S_{Na}], amer [S_A], note aromatique [S_F]). Chaque critère possède un score de 1 à 5 et un score d'importance [I_x] qui traduit l'importance du critère par rapport aux autres critères allant de 1 à 3. Un score idéal [S_x] a également été choisi pour chaque critère. Chaque score est soustrait au score idéal et donné en valeur absolue, et est ensuite multiplié par le score d'importance. Un sous-total est obtenu par catégorie et l'addition de ces 3 valeurs permet d'obtenir le score total. Plus celui-ci est faible, plus il est proche de la valeur idéale. Les scores d'importance et le référentiel utilisés pour le calcul du score total de dégustation d'un échantillon se trouvent dans le Tableau 24.

Score total de dégustation (STD)

$$\begin{aligned} &= [(|A_C - S_{Ac}| \times I_{Ac}) + (|A_P - S_{Ap}| \times I_{Ap}) + (|A_H - S_{Ah}| \times I_{Ah})] \\ &+ [(|T_T - S_{Tt}| \times I_{Tt}) + (|T_E - S_{Te}| \times I_{Te}) + (|T_D - S_{Td}| \times I_{Te}) + (|T_F - S_{Tf}| \times I_{Te})] \\ &+ [(|S_S - S_{Ss}| \times I_{Ss}) + (|S_{Na} - S_{Sna}| \times I_{Sna}) + (|S_A - S_{Sa}| \times I_{Sa}) + (|S_F - S_{Sf}| \times I_{Sf})] \end{aligned}$$

Équation 8 : Score total de dégustation

Tableau 24 : Importance et référentiel utilisé pour le calcul du score total de dégustation (Importance : 1=peu important, 2=important, 3=très important)

	<u>Apparence</u>			<u>Texture</u>				<u>Saveur</u>			<u>Divers</u>		
	Couleur	Cuisson de la pâte	Homogénéité de la pâte	Tendreté	Elasticité	Densité	Friabilité	Sucré	Salé	Amer	Goût	Impression générale	Acceptabilité générale
Importance	1	3	2	1	1	2	3	2	2	3	1	3	3
Référentiel	3	4	5	3	3	1	1	3	1	1	4	5	5

2.6.5. ANALYSE DE LA TEXTURE

PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS POUR LA MESURE AU TEXTUROMÈTRE

Cuisson classique au gaufrier

Chaque échantillon de gaufre comporte 5 cœurs. 3 cœurs ont été découpés à l'emporte-pièce de 445 mm de diamètre interne. 1 analyse complète comporte 9 mesures. Le diamètre a été mesuré à plat entre le bec fixe et le bec mobile du pied à coulisse.

Cuisson au four à micro-ondes

1 des 3 pièces de chaque échantillon a été mesurée au texturomètre. 1 analyse complète comporte 3 échantillons. Le diamètre a été mesuré à mi-hauteur de l'échantillon entre le bec fixe et le bec mobile du pied à coulisse.

Cuisson au four ohmique

Après la cuisson, un échantillon a été découpé à l'aide d'un emporte-pièce de diamètre ± 42 mm sur la hauteur du tube (Figure 28). Le diamètre a été mesuré à plat entre le bec fixe et le bec mobile du pied à coulisse.

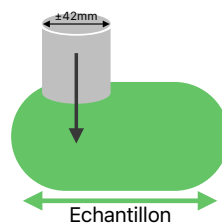


Figure 28 : découpe d'un échantillon de gaufre cuite au four ohmique pour l'analyse texturométrique

TEXTUROMÈTRE

Les données texturométriques ont été mesurées à l'aide du texturomètre Ametek test & calibration instruments TA1 Lloyd materials testing 210 dotée d'une sonde LC 500N Lloyd instruments. Les paramètres choisis sont exprimés dans le Tableau 25. La compression a été réalisée à l'aide d'une tête cylindrique de 50 mm de hauteur et 51 mm de diamètre. Les données ont été traitées avec le logiciel NexygenPlus Materials Testing Software version 4.1.1.829.

Tableau 25 : Paramètres fixes du texturomètre pour la compression.

Paramètres du texturomètre	
Intensité de la compression (pourcentage de la hauteur de l'échantillon)	25%
Vitesse de la précharge	50 mm/m
Vitesse de compression	0,91667 mm/s
Temps d'attente entre 2 compressions	10 s
Précharge	3 N

2.7. CARACTÉRISATION DES BIOMASSES DE SPIRULINE

Deux biomasses ont été utilisées afin de réaliser les tests : La spiruline de la société Astrofood et de la ferme à spiruline française Etika. Leur méthode de culture et traitement et leur composition nutritionnelle sont résumées dans le Tableau 26.

Tableau 26 : caractéristiques de la spiruline ASTROFOOD et de la spiruline ETIKA

Données	Astrofood	Etika
Culture		
Espèce	Limnospira indica	Limnospira indica
Méthode de culture	Bioréacteur contrôlé (fermé)	Raceway pond (ouvert)
Process		
Pressage	Filtration dans un tamis circulaire.	Pressage sous-vide : la spiruline est mise dans une valise de pressage Rampelt suivi d'une mise sous-vide avec une pression accrue pendant 20 minutes.
Traitement avant congélation	La biomasse est mise sous-vide et congelée.	Récolte Filtration Rinçage à l'eau osmosée Filtration Pressage Refroidissement Mise sous-vide
Congélation / surgélation	Congélation lente : -20°C	Congélation lente : ±3h -18°C
Recommandations	/	Max 30g de spiruline fraîche/jour/personne afin d'éviter un surdosage en fer, vitamine K et des troubles digestifs.

Composition nutritionnelle (100g de matière fraîche)

	Astrofood	Etika
Energie (Kcal)	34,53	93,70
Eau (g)	90,15	77,30
Protéines N x 6,25 (g)	6,30	17,00
Glucides (g)	0,87	2,6
Lipides (g)	0,65	1,7
Sucres (g)	0,22	0,25
Fibres alimentaires (g)	1,22	-
Cendres (g)	0,60	1,30
Chlorure de sodium (g)	0,37	0,51
Calcium (mg)	-	85,10
Fer (mg)	9,60	15,00
Magnésium (mg)	35,40	57,50
Phosphore (mg)	132,60	-
Potassium (mg)	187,80	-
Rétinol (µg)	27341,65	-

Données	Astrofood	Etika
Beta-carotène (µg)	-	70,80
Vitamine K1 (µg)	146,15	-
Thiamine (mg)	362,00	-
Riboflavine (mg)	381,60	-
Niacine (mg)	1211,00	-
Acide pantothénique (mg)	20,00	-
Vitamine B6 (mg)	90,00	-
Folates totaux (µg)	4,05	-
Vitamine B12 (µg)	25,45	-

Afin de compléter les caractéristiques du Tableau 26 ci-dessus, des analyses supplémentaires sur ces deux biomasses ont été effectuées :

- A) La caractérisation aromatique via l'analyse des composés organiques volatils par chromatographie gazeuse et spectrométrie de masse telle que décrite au point 2.8. Analyses d à la page 76 ;
- B) La couleur par colorimétrie telle que décrite au point 2.10. Colorimétrie à la page 77 ;
- C) La cinétique de cuisson et de conductivité de la biomasse par traitement ohmique a été réalisée à l'aide de la même méthode utilisée pour les échantillons cuits au four ohmique et décrite au point 2.5.2 à la page 68.

2.8. ANALYSES DES COMPOSÉS AROMATIQUES

L'analyse été réalisée sur la spiruline fraîche Etika et Astrofood, la spiruline sèche Etika réhydraté pour obtenir la même concentration que la spiruline fraîche Etika et les échantillons Cs.R.G#SMG et Sf.R.G#Sas. Les deux derniers échantillons ont été broyés et $\pm 1,5$ g de matière a été ajoutée dans une vial pour chaque analyse. Les vials ont été placées dans le système de chromatographie en phase gazeuse Agilent Technologies 7980A GC system couplé au spectromètre de masse Agilent Technologies 5975C inert XL EI/CI MSD avec un axe de détection triple. La colonne équipée est une HP-5MS 5% Phenyl Methyl Silox. L'extraction a été réalisée à l'aide d'une fibre SPME GC-MS. Le détail des paramètres d'analyses figure dans le Tableau 27.

Tableau 27 : détails des paramètres de la chromatographie en phase gazeuse.

Paramètre de contrôle de l'instrument	
Source d'injection	Manuelle
Programme du four	40°C pendant 2 minutes, ensuite 5°C/min jusqu'à 300°C pendant 5 minutes
Temps d'équilibration du four	0,5 minutes
Durée	59 minutes
Conditions de la colonne	
Dimensions de la colonne	30m x 250 µm x 0,25 µm
Température de départ	40°C
Pression	8,8271 psi
Débit	1,168 mL/min
Conditions du mode d'injection	
Mode d'injection	Splitless

Paramètre de contrôle de l'instrument	
Température du chauffage	280°C
Flux total	54,168mL/min
Conditions du mode de détection	
Mode de détection	Balayage (scan)
Masse balayée	De 35,0 à 550,0 m/z
Seuil	150

La méthode d'analyse des échantillons est basée sur les travaux de Suffys et al. (2023). Elle a été réalisée à l'aide du programme Agilent Mass Hunter Analysis par comparaison des bases de données NIST17 et WILEY275 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA) et les indices de rétentions (RI) de la littérature (Linstrom et al., 2001). Seules les molécules ayant un facteur de correspondance supérieur ou égal à 70% ont été retenues. Ensuite, un traitement manuel des données a été réalisé afin de valider individuellement chaque molécule avec les références des spectres de masses de la littérature. Enfin, les RI des molécules ont été pris en compte pour renforcer l'hypothèse de validation. Afin d'améliorer la quantification relative des espèces volatiles, les valeurs ont été déduites en relation avec un standard interne (octyl-benzène 5,45mg/ml) qui a été injecté. L'indice d'activité olfactive (OAV) a été déterminé comme le rapport entre la concentration du composé au sein de l'échantillon et son seuil de perception par voie ortho-nasale dans un milieu aqueux, tel que cité dans la littérature³⁵.

2.9. ACTIVITÉ DE L'EAU DE LA POUDRE DE GAUFRE (SPIRULINE)

La mesure de l'activité de l'eau a été réalisée sur le mélange de poudre avant sa réhydratation. La poudre est disposée dans une cupule de mesure (aqualab) jusqu'à mi-hauteur. Elle est ensuite amenée à 20°C dans une Chambre Zanotti. La cupule est ensuite insérée dans l'Aqualab® Decagon CX3 qui mesure l'activité de l'eau. 3 répétitions ont été effectuées.

2.10. COLORIMÉTRIE

La colorimétrie a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre ColorFlex EZ. L'échantillon est placé dans une cuvette en verre optiquement neutre de 64 mm de diamètre jusqu'à hauteur de l'anneau de référence, un disque opaque blanc est ensuite posé au-dessus du produit pour fermer la cuvette. La cuvette est posée sur l'appareil et un couvercle opaque est posé au-dessus de la cuvette. 3 répétitions de la mesure ont été effectuées par échantillon.

2.11. VALEURS NUTRITIONNELLES

Les valeurs nutritionnelles des différentes gaufres ont été calculées à l'aide des données fournies par la table de composition nutritionnelle des aliments CIQUAL établie par l'ANSES et disponible sur le site <https://ciqual.anses.fr/>.

2.12. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

³⁵ The Good Scents Company Information System – informations pour les industries sensorielles, de la parfumerie, de l'alimentaire et des Cosmétiques | 1980-2021. The Good Scents Company. Consulté le 10 août 2023, <http://www.thegoodscentscompany.com/>

Tous les échantillons ont été réalisés en triplicat. Les données sont exprimées par leur moyenne \pm leur écart-type standard. Elles ont été traitées à l'aide des programmes informatiques Excel (Microsoft Excel 2021, version 16.74), R (R 4.3.0) et R studio (version 2023.03.1+446, Posit software).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. CARACTÉRISTIQUES D'UNE GAUFRE MAISON ET DU COMMERCE

Les objectifs de cette première étude est de récolter des données sur la gaufre réalisée avec des produits frais et celle du commerce, ainsi que de déterminer les paramètres optimaux pour la cuisson micro-ondes. Dans cette première partie du protocole (Figure 29), deux cuissons sont réalisées, une au gaufrier et une au four à micro-ondes. Les paramètres utilisés pour le four à micro-ondes sont de 450W, 600W et 900W. Les analyses ont été réalisées sur tous les échantillons, ce qui a permis de récolter un certain nombre de données et de répondre aux objectifs.

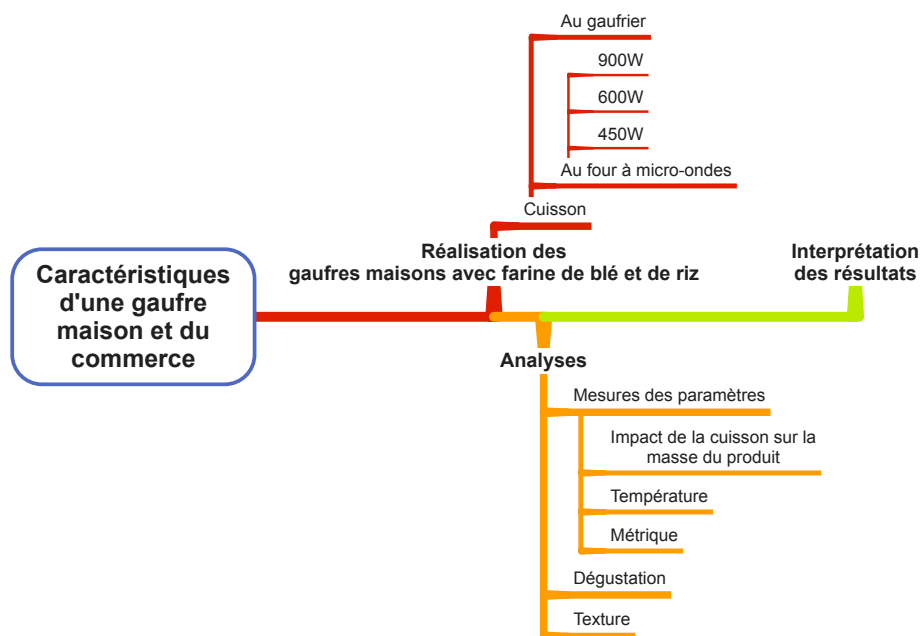


Figure 29 : protocole de production des gaufres aux produits frais et analyses des gaufres du commerce.

3.1.1. IMPACT DE LA CUISSON

Le Tableau 28 reprend les résultats de l'impact de la cuisson sur la dimension et la masse des gaufres maisons réalisées avec des produits frais. La Figure 30 permet de mettre en évidence une augmentation de la hauteur de la gaufre après-cuisson avec l'augmentation de la puissance du micro-onde, ce qui est en accord avec les résultats de Megahey et al. (2005). Les résultats concordent avec la masse volumique dans la Figure 31 : la masse pour un volume donné est plus faible lorsque la puissance du four augmente ; et avec la Figure 32 : plus la puissance du micro-ondes augmente, plus la perte de masse hydrique du produit diminue. Il y a également une différence significative de la diminution de masse entre la cuisson au gaufrier et celle au micro-ondes.

Tableau 28 : résultats des mesures des gaufres classiques aux produits frais

Tests	dimension min produit cru froid (cm)	Dimension hauteur Max produit cuit (cm) froid	Masse volumique g/cm ³	Température (°C)	poids avant cuisson	poids après cuisson	Pourcentage de réduction de poids
Cf.B.G	/	0,753±0,046	/	83,87±8,41	80,52±0,39	56,49±2,39	29,84±2,96%
Cf.B.MW.9	1,883±0,053	2,989±0,481	0,385±0,139	93,33±3,71	78,79±0,86	61,85±2,36	21,51±2,18%
Cf.B.MW.6	1,817±0,045	2,767±0,147	0,596±0,041	92,2±0,69	79,13±0,41	71,24±0,38	9,97±0,72%
Cf.B.MW.4	1,811±0,05	2,458±0,177	0,738±0,111	90,9±1,2	79,46±0,48	74,78±0,51	5,89±0,09%
Cf.R.G	/	0,767±0,142	/	83,57±4,39	81,22±0,63	57,5±1,45	29,2±2%
Cf.R.MW.9	1,811±0,025	2,672±0,087	0,577±0,067	94,17±0,67	79,16±0,08	67,21±2,61	15,1±3,21%
Cf.R.MW.6	1,811±0,025	2,511±0,075	0,837±0,152	94,27±0,59	79,55±0,12	74,89±0,32	5,87±0,52%
Cf.R.MW.4	1,792±0,028	2,267±0,205	0,838±0,057	92,73±2,57	79,58±0,22	75,46±0,77	5,17±0,81%

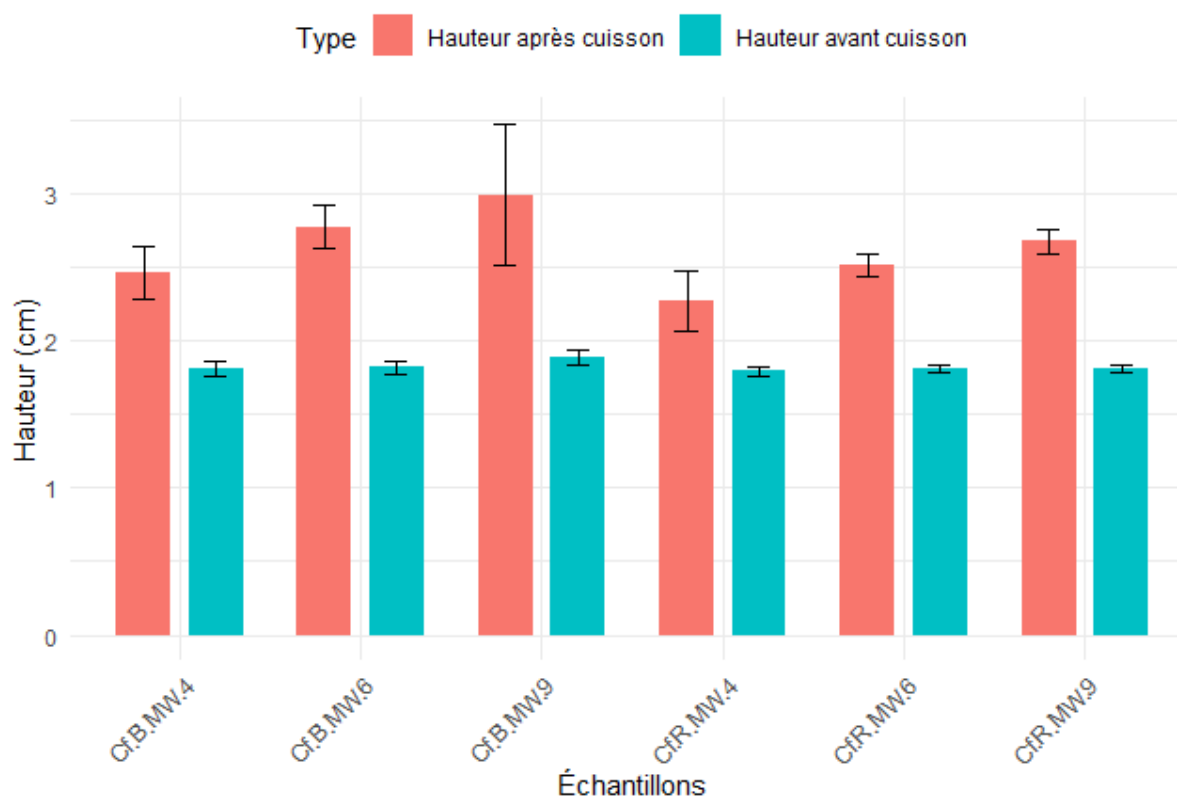


Figure 30 : Évolution de la hauteur de la gaufre à la cuisson classique aux produits frais cuites au micro-ondes

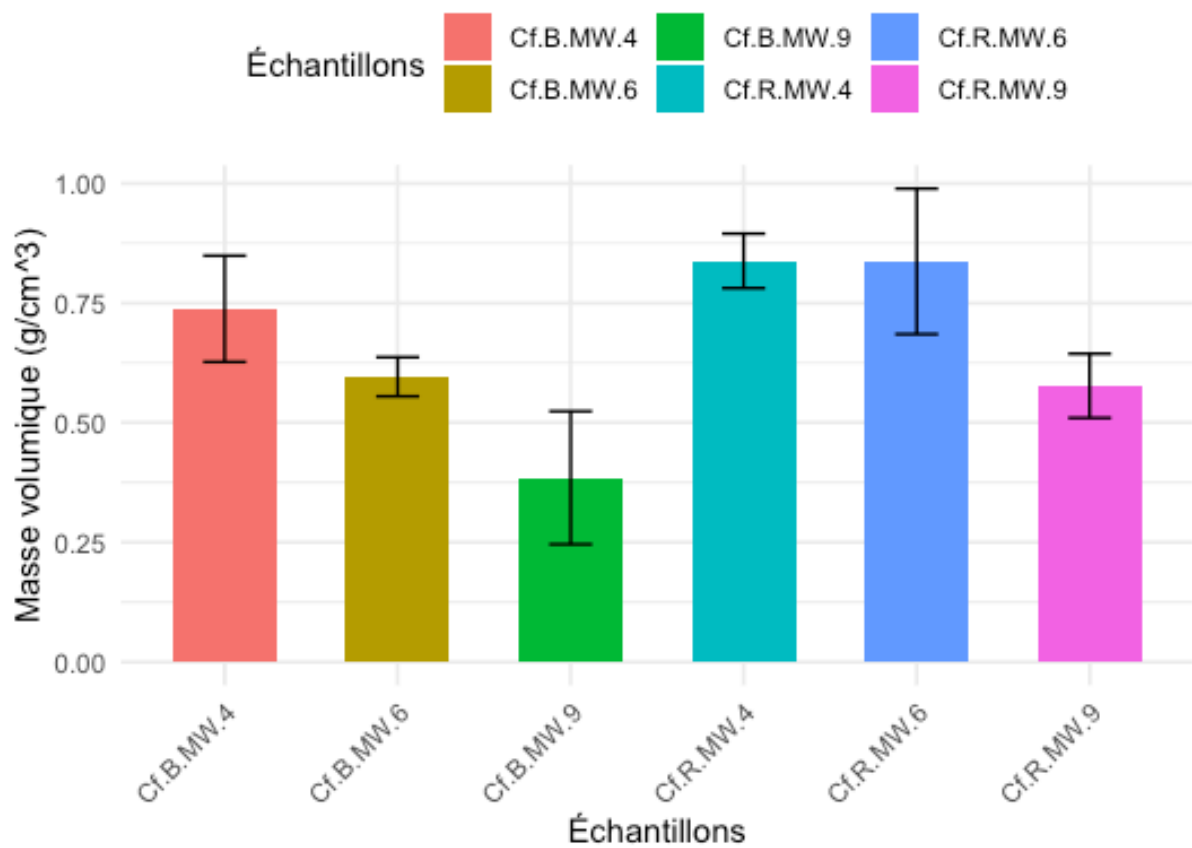


Figure 31 : comparaison des masses volumiques des gaufres classiques aux produits frais cuites au micro-ondes

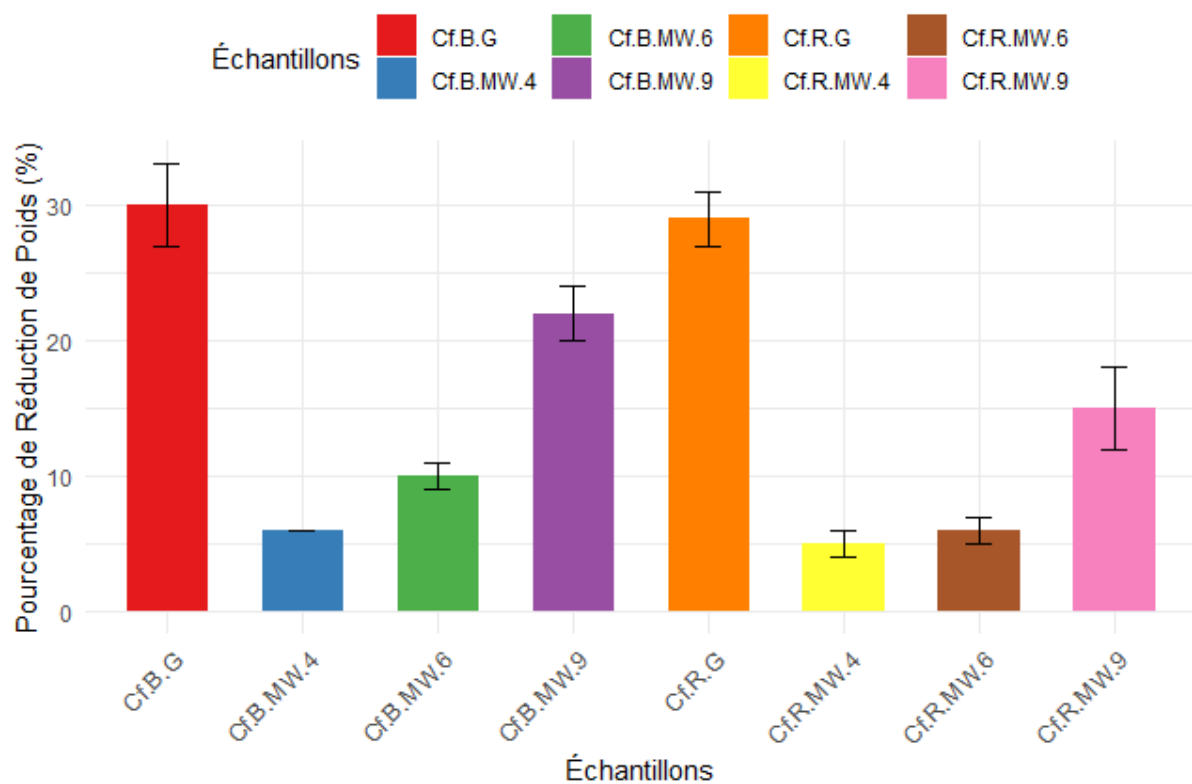


Figure 32 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres classiques aux produits frais

3.1.2. SCORE TOTAL DE DÉGUSTATION

Les résultats des STD du Tableau 29 sont représentés sous forme de toile à la Figure 33. La toile possède une échelle inversée avec la note la plus faible en extérieur et la note la plus élevée en intérieur. Plus le score est faible, plus l'échantillon est considéré comme bon donc plus la toile est grande, plus le score est bon. La gaufre du commerce possède le meilleur score, cela est dû au fait que la cuisson est régulière et le produit est plus abouti. La cuisson au gaufrier, malgré un score de saveur plus bas, possède un total particulièrement élevé pour deux raisons : premièrement, la cuisson n'est pas uniforme et cela est dû au matériel de cuisson peu fiable en terme d'homogénéité de chaleur. Deuxièmement, la grande production de miettes est un facteur multiplicateur très important. Au micro-ondes, la cuisson à 900W se retrouve en tête du classement.

Tableau 29 : Résultats des scores totaux de dégustation des gaufres classiques aux produits frais

Echantillons	Apparence	Texture	Saveur	Impression score	Acceptabilité score	Total
Com	2	3	0	3	0	5
Cf.B.G	7	11	3	3	3	21
Cf.B.MW.9	2	5	4	3	6	11
Cf.B.MW.6	4	3	4	3	6	11
Cf.B.MW.4	9	3	4	3	6	16
Cf.R.G	8	8	3	3	3	19
Cf.R.MW.9	2	7	4	3	6	13
Cf.R.MW.6	2	8	4	3	6	14
Cf.R.MW.4	9	7	4	3	6	20

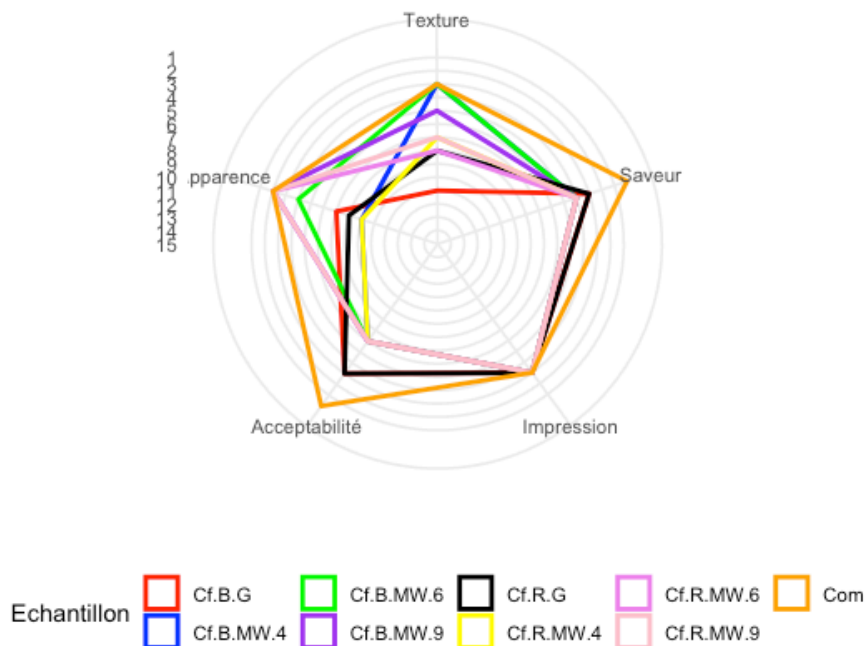


Figure 33 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits frais

La cuisson des gaufres au gaufrier possède un score élevé au niveau de l'apparence suite au manque d'homogénéité de la cuisson (Figure 34) alors que la cuisson au micro-ondes est plus homogène Figure 35



Figure 34 : photos de la cuisson de la gaufre Cf.B.G

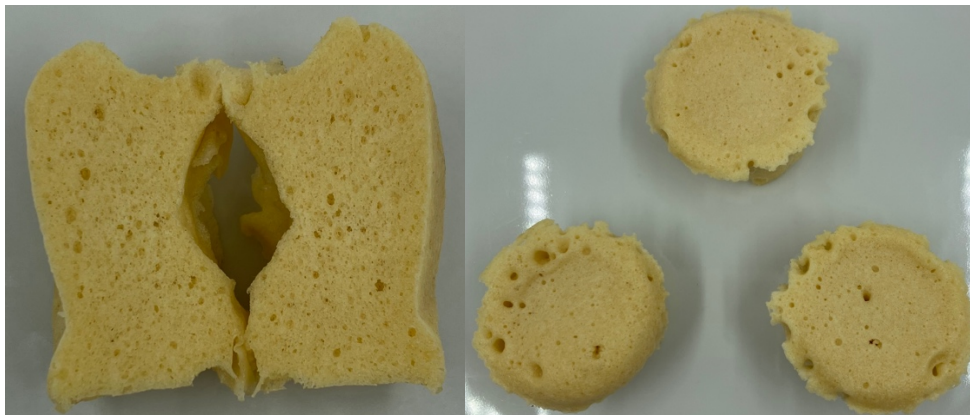


Figure 35 : photos de la cuisson de la gaufre Cf.B.MW.9

3.1.3. ANALYSES DE LA TEXTURE

Les données texturométriques du Tableau 30 sont exprimées sous forme de diagramme en bâtonnet dans la Figure 36. Les résultats montrent que la farine de riz rend la gaufre plus solide : les résultats de dureté, de masticabilité et de fracture sont tous plus élevés.

Tableau 30 : Données texturométriques des gaufres classiques aux produits frais

nom échantillon	diamètre rond texturo	Dureté (N)	Masticabilité (N)	Fracture (N)	Hauteur (mm)
Com	4,581±0,04	15,33±2,42	8,26±0,66	7,18±2,65	10,89±1,31
Cf.B.G	4,572±0,04	12,66±2,01	8,64±2,20	9,31±2,24	7,06±0,62
Cf.R.G	4,606±0,14	25,26±7,21	16,62±5,84	22,21±7,03	7,88±0,98
Cf.R.MW.9	4,15±0,27	24,68±2,11	14,29±1,50	24,39±1,93	24,09±0,23
Cf.R.MW.6	4,15±0,07	24,59±3,36	13,89±2,40	24,27±3,31	23,65±0,23
Cf.R.MW.4	4,2±0,05	29,46±4,73	14,2±2,82	29,33±4,64	22,08±0,70
Cf.B.MW.9	4,15±00	14,34±1,52	9,23±3,11	14,24±1,49	24,96±1,12
Cf.B.MW.6	4,208±0,06	13,61±3,17	8,02±2,45	13,45±3,14	22,28±1,28
Cf.B.MW.4	4,2±0,04	18,85±4,30	11,01±3,17	18,56±4,13	22,11±1,38

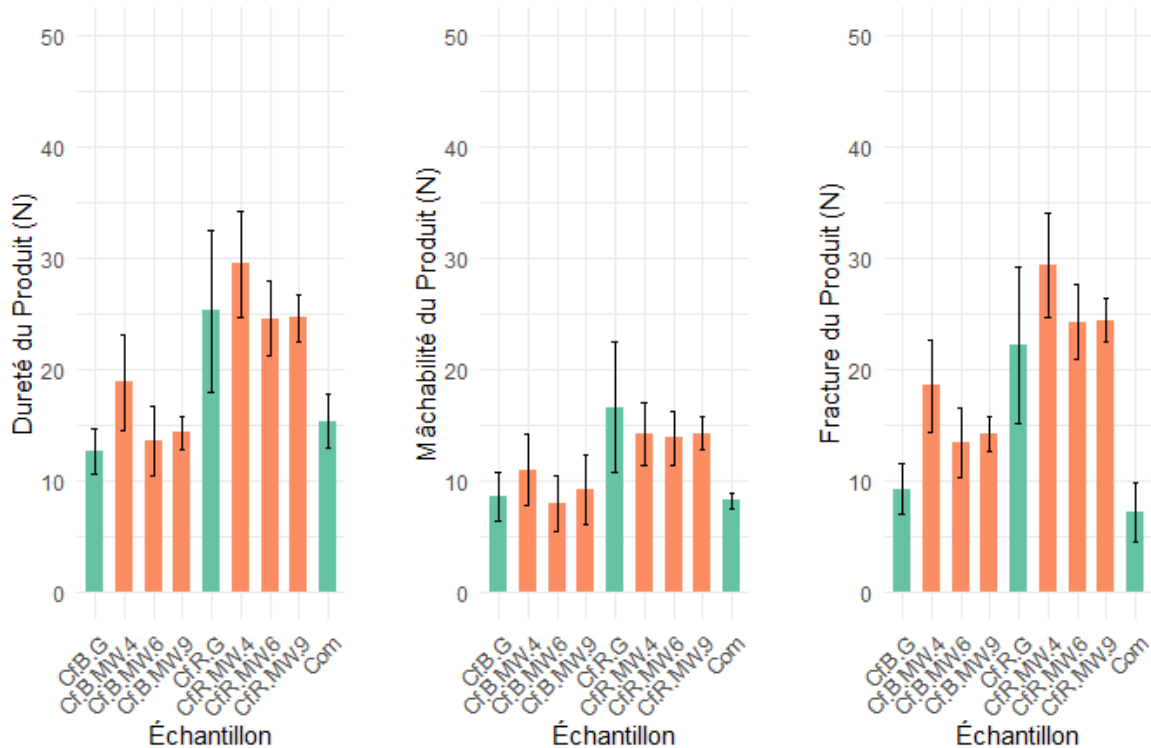


Figure 36 : diagramme de la dureté, de la masticabilité et de la fracture des gaufres classiques aux produits frais.

3.1.4. CONCLUSIONS

La cuisson au micro-ondes à 900W possède une meilleure capacité de gonflement ; cependant la réduction de poids à la cuisson est plus élevée, ce qui signifie que les pertes en eau sont plus élevées, et ce n'est pas idéal pour répondre aux critères ALISSE. Même si la perte reste bien inférieure comparée à la cuisson au gaufrier. Malgré ce défaut, les paramètres hédoniques mesurés sont les plus appréciés. Les paramètres de texture ne permettent pas d'établir que la cuisson au micro-ondes possède des caractéristiques particulières. Cependant, la farine de riz semble être plus intéressante afin d'obtenir un produit plus résistant. Cela devra être confirmé dans la suite de l'étude. La cuisson à 900W a donc été déterminée comme la plus optimale des 3 cuissons.

Les paramètres de la gaufre maison à base de produits frais au gaufrier et au four à micro-ondes sont ainsi validés pour la suite.

3.2. CARACTÉRISTIQUES D'UNE GAUFRE MAISON AVEC DES PRODUITS DÉSHYDRATÉS

Pour cette nouvelle itération, l'évaluation du produit similaire à la gaufre confectionnée à domicile mais fabriqué à partir d'ingrédients déshydratés est réalisée. Dans cette deuxième partie du protocole (Figure 37). Les objectifs sont de récupérer les caractéristiques de ces gaufres et d'établir la possibilité de remplacer le beurre par une autre matière grasse, voir aucune. A cet effet, le beurre, le mycryo et l'absence de matière grasse dans les gaufres ont été évalués.

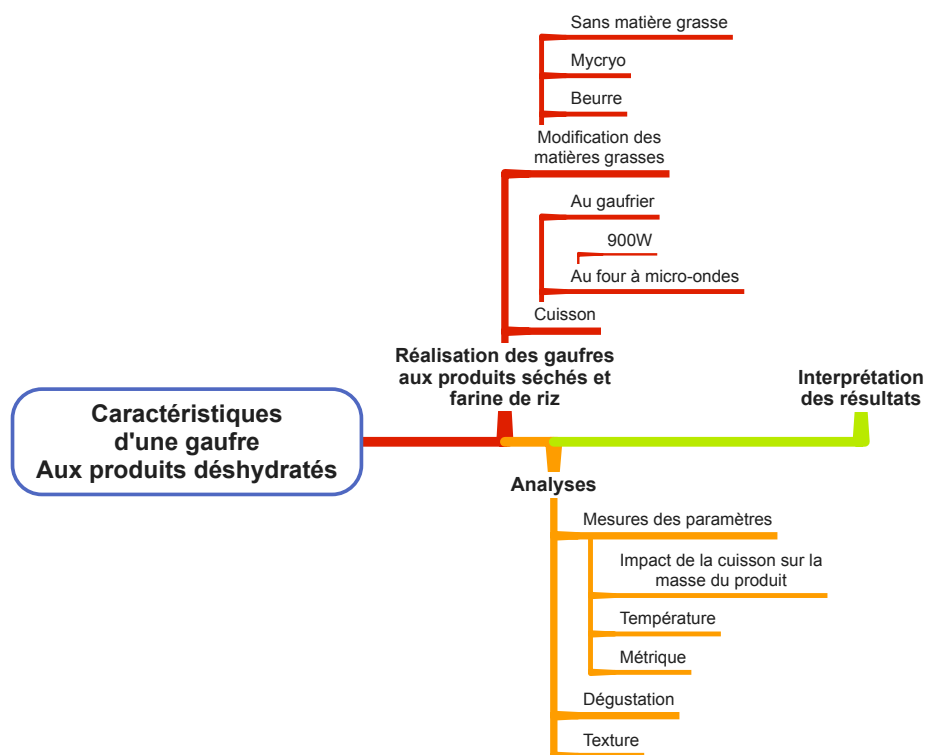


Figure 37 : Protocole de production des gaufres à base de produits déshydratés.

3.2.1. IMPACT DE LA CUISSON

Les résultats du Tableau 31 reprennent une partie des données de l'étude précédente pour pouvoir comparer les informations récoltées.

Pour la cuisson au four à micro-ondes, dans la Figure 38 l'évolution de la hauteur de la gaufre Cs ne présente pas de différence significative avec la gaufre Cf ; le type de matière grasse n'influence pas non plus la hauteur post-cuisson. Ce qui semble en accord avec le masse volumique (Figure 39) de chaque échantillon qui ne semble pas avoir de différence significative au vu de la variabilité des mesures, et avec le pourcentage de réduction de poids (Figure 41) qui pareillement, ne varie que très peu entre les échantillons.

Les observations sont similaires pour les gaufres cuites au gaufrier. Le pourcentage de réduction de poids (Figure 40) ne varie quasi pas entre les échantillons.

La matière grasse ne semble pas influencer l'aspect volumétrique de la gaufre ni le pourcentage d'évaporation.

Tableau 31 : résultats des mesures des gaufres classiques aux produits déshydratés

Tests	dimension min produit cru froid (cm)	dimension hauteur Max produit cuit (cm) froid	Masse volumique g/cm ³	température °C	poids avant cuisson	poids après cuisson	Pourcentage de réduction de poids
Cf.B.G	/	0,753±0,046	/	83,87±8,41	80,52±0,39	56,49±2,39	29,84±2,96%

Tests	dimension min produit cru froid (cm)	dimension hauteur Max produit cuit (cm) froid	Masse volumique g/cm ³	température °C	poids avant cuisson	poids après cuisson	Pourcentage de réduction de poids
Cf.B.MW.9	1,883±0,053	2,989±0,481	0,385±0,139	93,33±3,71	78,79±0,86	61,85±2,36	21,51±2,18%
Cf.R.G	/	0,767±0,142	/	83,57±4,39	81,22±0,63	57,5±1,45	29,2±2%
Cf.R.MW.9	1,811±0,025	2,672±0,087	0,577±0,067	94,17±0,67	79,16±0,08	67,21±2,61	15,1±3,21%
Cs.B.G#B	/	0,681±0,084	/	87,7±2,69	82,12±0,91	58,86±2,73	28,34±2,6%
Cs.B.G#Mi	/	0,622±0,091	/	91,03±2,06	81,64±0,51	57,35±1,8	29,76±1,81%
Cs.B.G#SMG	/	0,675±0,048	/	92±6,65	82,36±0,9	58,58±0,83	28,87±0,24%
Cs.B.MW#B	1,731±0,037	2,456±0,209	0,771±0,148	94,3±2,52	78,57±0,46	66,63±3,76	15,21±4,32%
Cs.B.MW#Mi	1,717±0,022	2,631±0,293	0,881±0,105	96,03±0,95	78,26±0,23	65,33±2,74	16,52±3,4%
Cs.B.MW#SMG	1,717±0,022	2,597±0,225	0,615±0,26	97,03±1,01	79,64±0,54	68,49±0,87	14,01±0,57%
Cs.R.G#B	/	0,558±0,057	/	88,33±2,64	81,44±0,37	59,45±0,66	27,01±0,49%
Cs.R.G#Mi	/	0,522±0,072	/	92±3,12	80,51±0,53	57,05±2,05	29,15±2,14%
Cs.R.G#SMG	/	0,539±0,085	/	92,67±2,42	81,08±0,35	59,52±1,6	26,58±2,15%
Cs.R.MW#B	1,719±0,021	2,383±0,113	0,926±0,332	96,93±0,64	79,96±0,39	67,53±1,74	15,55±2,21%
Cs.R.MW#Mi	1,714±0,018	2,258±0,131	0,754±0,04	96,83±2,11	80,03±0,49	69,28±1,2	13,43±1,35%
Cs.R.MW#SMG	1,706±0,011	2,431±0,127	0,666±0,035	97,1±0,35	79,64±0,16	69,46±0,79	12,78±1,15%
Cs.R.MW#Plat	0,714±0,013	1,113±0,139	0,685±0,072	90,25±5,44	80,05±0,15	65,9±0,85	17,67±1,18%

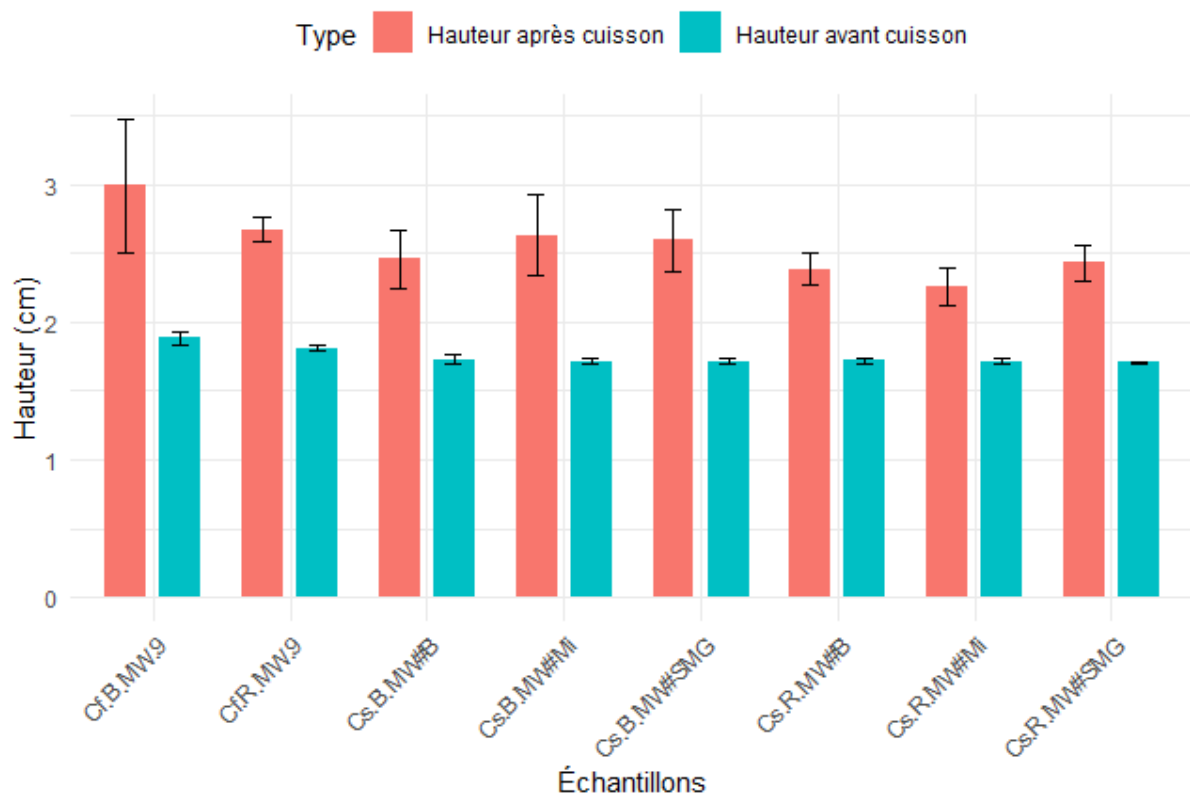
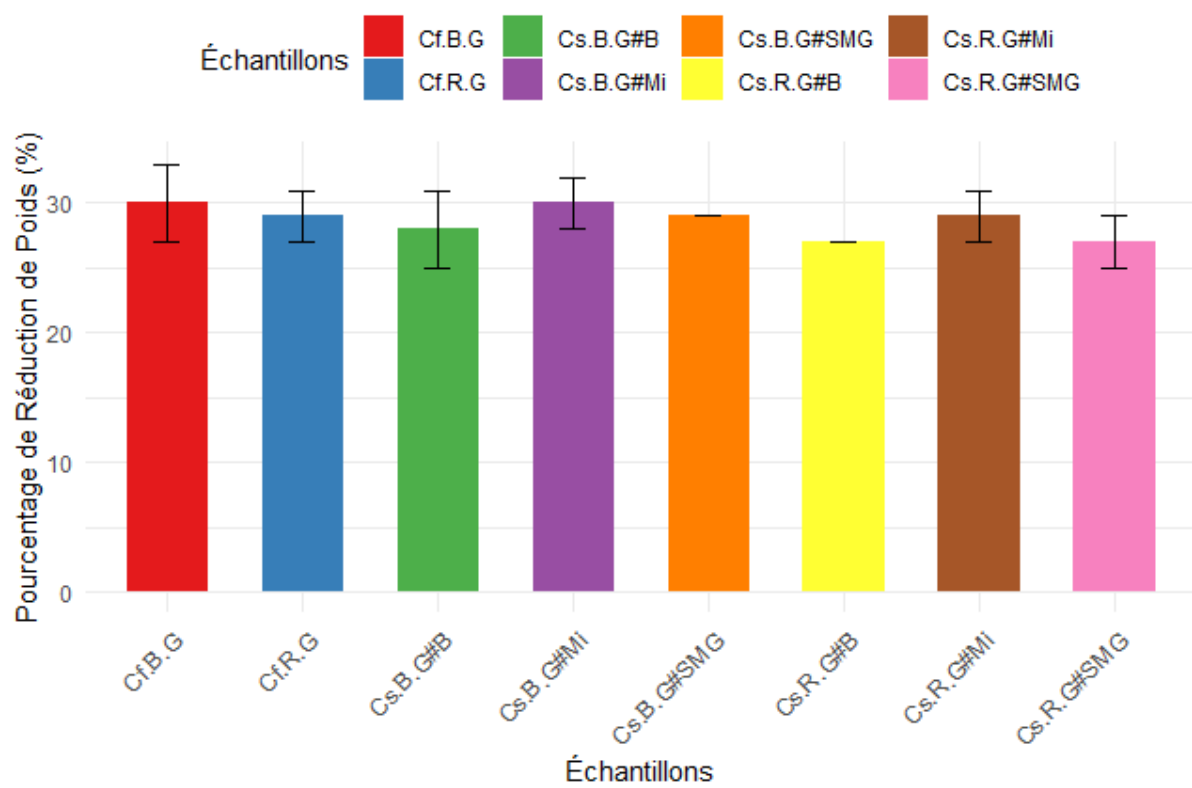
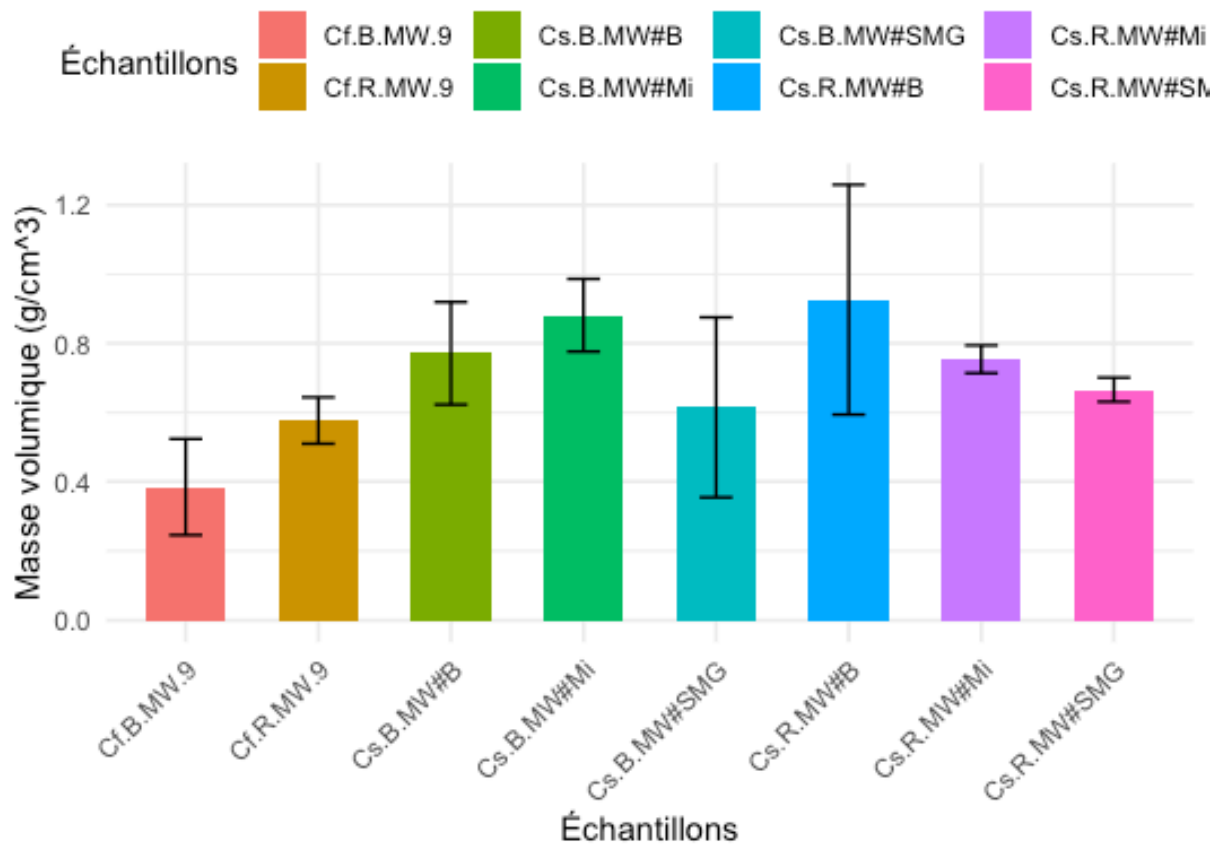


Figure 38 : Evolution de la hauteur à la cuisson des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au micro-ondes



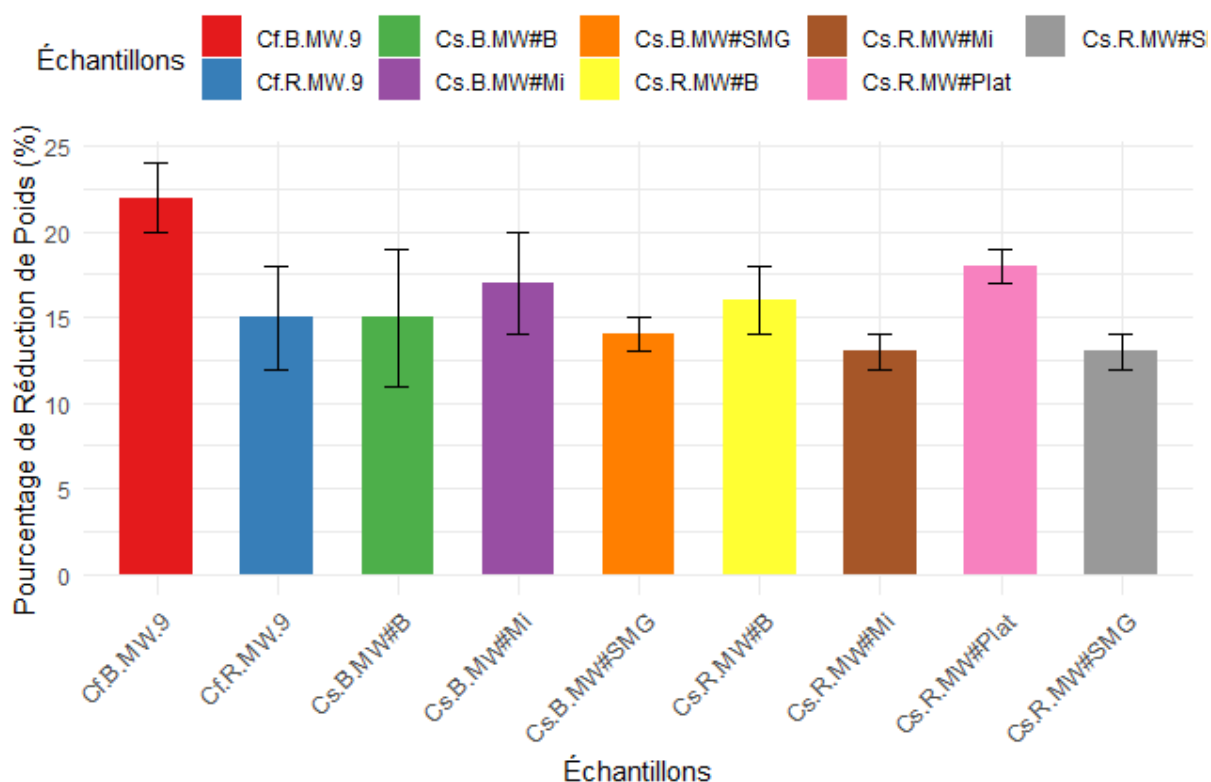


Figure 41 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au micro-ondes

3.2.2. SCORE TOTAL DE DÉGUSTATION

L'analyse des STD du Tableau 32 a été effectuée en plusieurs toiles afin de garder une certaine lisibilité des graphiques, au vu du nombre de données. La Figure 42 reprend les échantillons cuits au gaufrier, la Figure 43, ceux cuits au four à micro-ondes et la Figure 44, les meilleurs résultats des deux cuissons en comparaison aux gaufres à base de produits frais. Les résultats montrent clairement une préférence pour les gaufres sans matières grasses, malgré une faible différence avec celles au beurre. Les résultats au mycryo ne sont clairement pas concluants et le beurre n'ajoute pas de plus-value au produit. Les gaufres au micro-ondes (Figure 35) sont particulièrement peu attirantes pour la farine de blé, d'autant plus pour le mycryo par rapport à celles à base de farine de riz (Figure 46). Toutefois, aucun score ne passe sous la barre de 10.

Tableau 32 : Résultats des scores totaux de dégustation des gaufres classiques aux produits déshydratés.

Echantillons						Total
	Apparence	Texture	Saveur	Impression score	Acceptabilité score	
Com	2	3	0	3	0	5
Cf.B.G	7	11	3	3	3	21
Cf.B.MW.9	2	5	4	3	6	11
Cf.R.G	8	8	3	3	3	19

Echantillons	Apparence	Texture	Saveur	Impression score	Acceptabilité score	Total
Cf.R.MW.9	2	7	4	3	6	13
Cs.B.G#B	11	13	1	3	4,5	25
Cs.B.G#Mi	11	10	3	3	4,5	24
Cs.B.G#SMG	11	15	3	3	4,5	29
Cs.B.MW#B	4	2	4	6	7,5	10
Cs.B.MW#Mi	5,5	2	4	6	7,5	11,5
Cs.B.MW#SMG	5,5	2	4	6	7,5	11,5
Cs.R.G#B	6	6	1	3	6	13
Cs.R.G#Mi	9	9	1	3	6	19
Cs.R.G#SMG	9	12	1	3	6	22
Cs.R.MW#B	3	7	10	6	3	20
Cs.R.MW#Mi	3	6	3	9	9	12
Cs.R.MW#SMG	4	4	2	3	6	10
Cs.R.MW#Plat	4	4	4	3	6	12

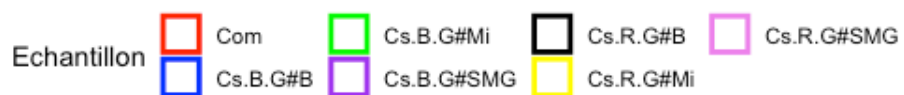


Figure 42 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au gaufrier

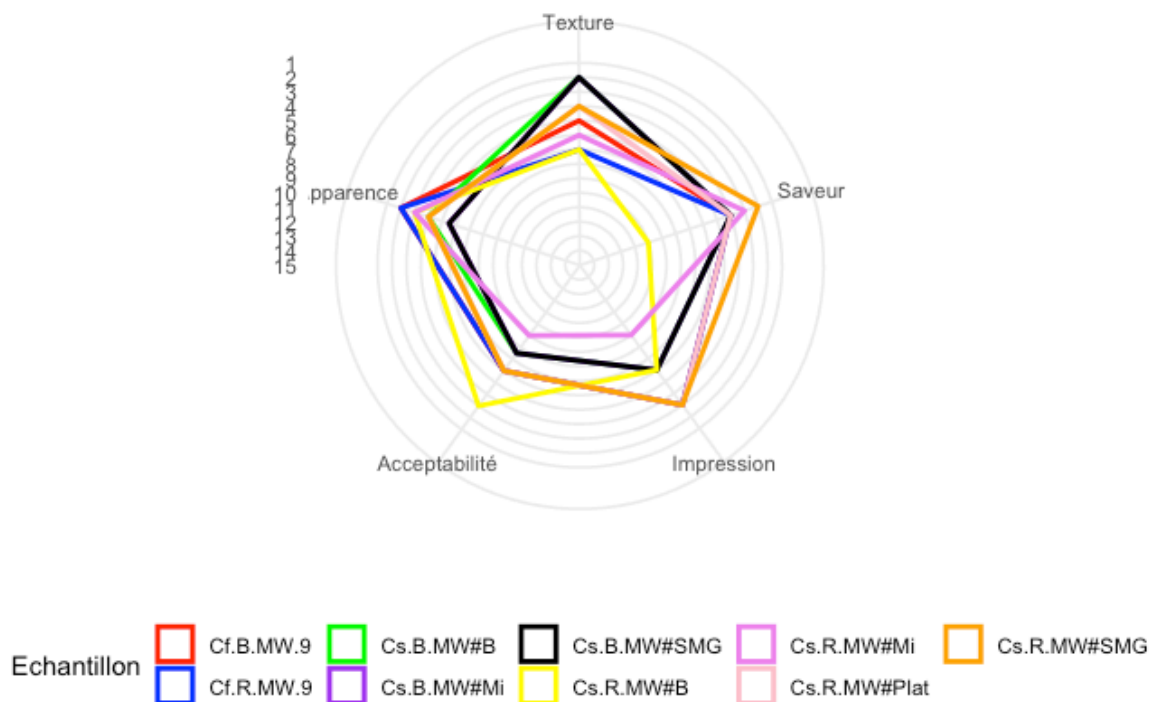


Figure 43 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits déshydratés cuites au micro-ondes

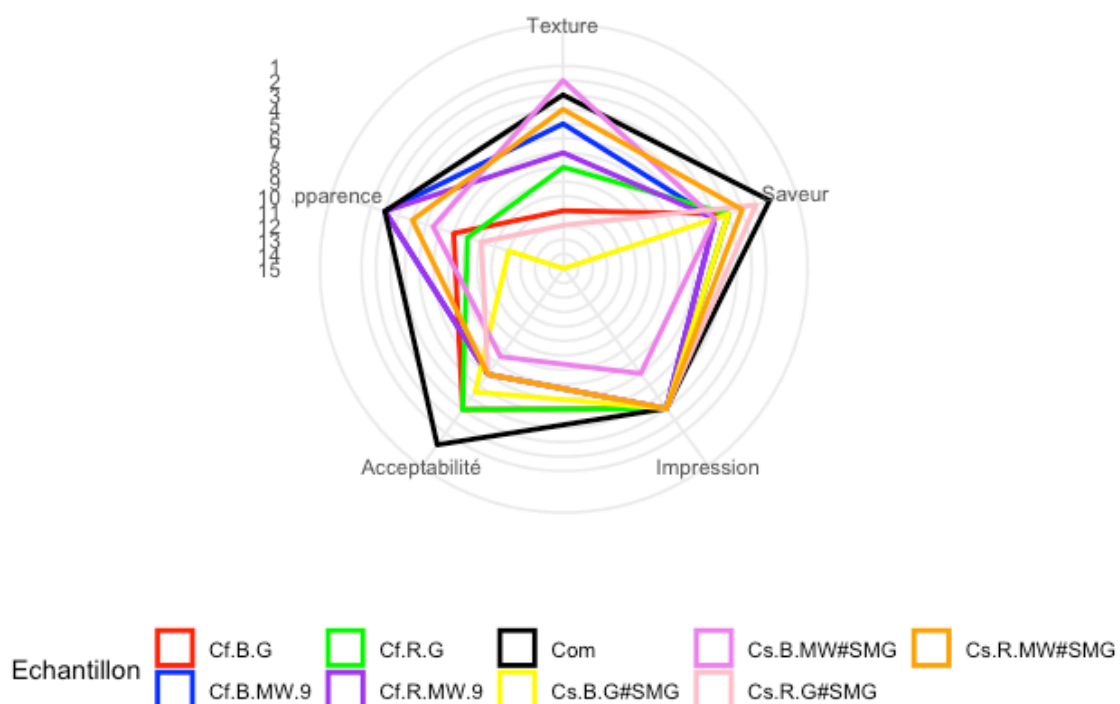


Figure 44 : représentation en toile des STD des gaufres classiques aux produits déshydratés comparées aux gaufres classiques aux produits frais



Figure 45 : photo de la cuisson interne des échantillons Cs.B.MW#B, Cs.B.MW#Mi et Cs.B.MW#SMG (de gauche à droite)



Figure 46 : photo de la cuisson interne des échantillons Cs.R.MW#B, Cs.R.MW#Mi et Cs.R.MW#SMG (de gauche à droite)

3.2.3. ANALYSES DE LA TEXTURE

Les données textuométriques du Tableau 33 sont exprimées sous forme de diagramme en bâtonnet dans la Figure 47, pour les échantillons cuits au gaufrier, et dans la Figure 48, pour les échantillons cuits au four à micro-ondes. Les résultats sont similaires à la première étude, la cuisson influence peu la texture mais la farine de riz impacte clairement l'ensemble des paramètres de la texture. La farine de riz permet d'obtenir un résultat plus homogène, plus résistant et avec une texture plus agréable que les productions de gaufres à base de blé.

Tableau 33 : Données textuométriques des gaufres classiques aux produits déshydratés.

nom échantillon	diamètre rond texturo	Dureté (N)	Masticabilité (N)	Fracture (N)	Hauteur (mm)
Com	4,581±0,039	15,33±2,42	8,26±0,66	7,18±2,65	10,89±1,31
Cf.B.G	4,572±0,042	12,66±2,01	8,64±2,2	9,31±2,24	7,06±0,62
Cf.R.G	4,606±0,14	25,26±7,21	16,62±5,84	22,21±7,03	7,88±0,98
Cf.R.MW.9	4,15±0,265	24,68±2,11	14,29±1,5	24,39±1,93	24,09±0,23
Cf.B.MW.9	4,15±0	14,34±1,52	9,23±3,11	14,24±1,49	24,96±1,12
Cs.B.G#B	4,614±0,115	10,92±1,29	7,91±1,07	7,76±1,41	6,61±0,58
Cs.B.G#Mi	4,569±0,084	15,56±3,55	11,35±2,94	7,52±1,27	5,87±0,82
Cs.B.G#SMG	4,528±0,092	12,26±1,37	9,11±1,38	8,56±3,03	6,58±0,43
Cs.R.G#B	4,569±0,057	28,99±3,67	20,1±3,79	16,8±7,32	5,49±0,43
Cs.R.G#Mi	4,567±0,07	25,92±6,02	18,66±5,11	14,3±4,97	5,42±0,3
Cs.R.G#SMG	4,539±0,086	19,65±4,43	12,87±4,11	13,58±6,59	5,86±0,48
Cs.B.MW#B	3,808±0,095	13,99±0,71	7,57±0,89	13,82±0,77	20,83±0,24
Cs.B.MW#Mi	3,917±0,058	10,93±3,47	6,18±2,29	10,81±3,52	21,83±2,14
Cs.B.MW#SMG	3,792±0,267	11,8±3,12	6,33±2,06	11,71±3,11	22,78±0,54
Cs.R.MW#B	3,9±0,05	27,32±3,17	15,96±2,28	26,9±3,19	22,09±0,35
Cs.R.MW#Mi	3,825±0,043	29,03±4,55	16,82±2,85	28,73±4,34	20,85±0,58

nom échantillon	diamètre rond texturo	Dureté (N)	Masticabilité (N)	Fracture (N)	Hauteur (mm)
Cs.R.MW#SMG	3,942±0,014	21,05±4,97	12,15±3,42	20,76±4,91	22,4±0,56
Cs.R.MW#Plat	3,775±0,098	14,5±3,12	8,65±2,76	13,42±2,37	9,79±0,44

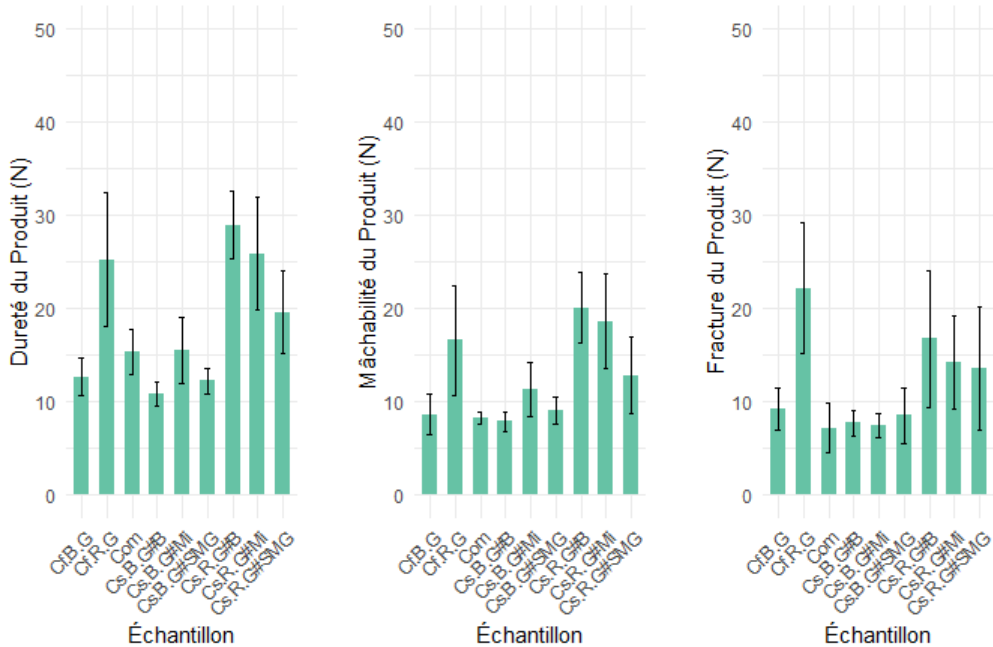


Figure 47 : diagramme de la dureté, de la Masticabilité et de la fracture des gaufres classiques aux produits séchés cuites au gaufrier.

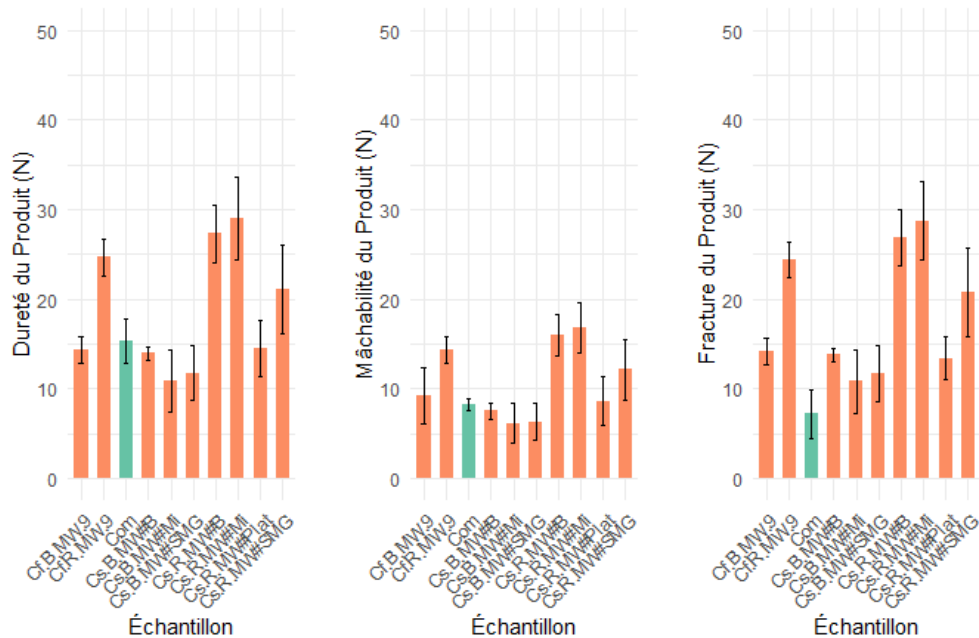


Figure 48 : diagramme de la dureté, de la Masticabilité et de la fracture des gaufres classiques aux produits séchés cuites au micro-ondes.

3.2.4. CONCLUSIONS

L'impact sur la cuisson de la présence et de la nature des matières grasses est trop faible que pour être observée. La différence se fait surtout remarquer au niveau de la dégustation des échantillons ; étant donné que les analyses de texture nous offre des résultats similaires à la première étude, cela nous permet de confirmer que la farine de riz influence positivement la consistance du produit.

Au final, les produits les plus intéressants sont les échantillons sans matière grasse, et au vu des résultats de texture et de dégustation, les prochaines formulations intégrerons de la farine de riz.

Les échantillons qui serviront de référence pour évaluer nos prochains résultats sont les essais Cf.R.G, Cf.R.MW.9, Cs.R.G#SMG et Cs.R.MW#SMG.

3.3. CARACTÉRISATION DES BIOMASSES ET DES GAUFRES À BASE DE SPIRULINE

La dernière étude du travail a pour objectif de caractériser d'avantage les biomasses utilisées, réaliser une recette de gaufre à la spiruline fraîche, équivalente à celle à base de produits séchés, et réaliser des analyses complémentaires tel que le profil aromatique, la cinétique de cuisson des gaufres au four ohmique, la colorimétrie et l'activité de l'eau du mélange de poudre. Dans ce protocole (Figure 49), les productions au gaufrier et au four à micro-ondes ont d'abord été réalisées, car le four ohmique est arrivé en fin de projet. Une fois arrivé, les essais ont pu commencer, et il a été possible de réaliser les productions de gaufres les plus intéressantes au vu des résultats précédents. Suite à cela, les tests complémentaires ont été effectués afin de compléter le projet.

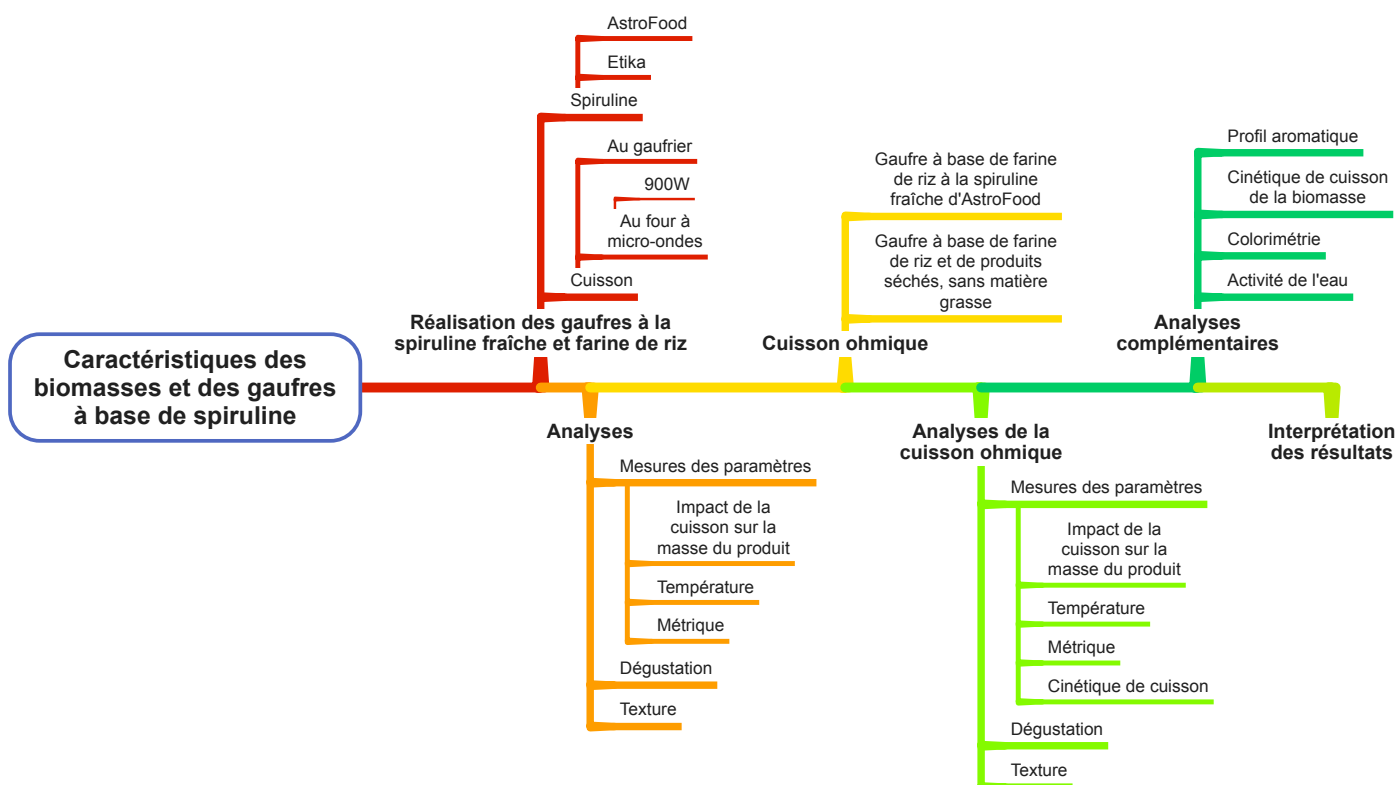


Figure 49 : protocole de production des gaufres à base de spiruline fraîche et analyses complémentaires.



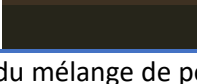


3.3.1. COLORIMÉTRIE ET ACTIVITÉ DE L'EAU DES INGRÉDIENTS

La colorimétrie a été réalisée sur les spirulines pures, le mélange de poudres et les échantillons Sf.R.G#Sas et Sf.R.OH.V2#Sas ; le Tableau 34 reprend les données des mesures réalisées. La cuisson au gaufrier et celle au four ohmique ont été comparées afin de mettre l'accent sur l'impact de la conduction thermique sur la couleur de la gaufre : la couleur brune est plus prononcée au gaufrier.

La couleur de la spiruline d'AstroFood est bien plus foncée que celle d'Etika alors que la concentration en matière sèche de la seconde est deux fois plus élevée. Peut-être que cela est due au niveau d'ensoleillement qui est moins contrôlé dans la ferme à ciel ouvert, c'est une piste à approfondir.

Malgré tout, cela reste compliqué d'obtenir une couleur de dessert attrayante avec un tel niveau d'incorporation de biomasse, le produit ne peut être que vert foncé – brun foncé.

Tableau 34 : résultats de l'analyse colorimétriques de la spiruline fraîche d'AstroFood, d'Etika, du mélange de poudres, des gaufres Sf.R.G#Sas et Sf.R.OH.V2#Sas avec leur couleur correspondante.

Colorimétrie				
	L	A	B	Couleur
Spiruline astrofood	8,84±0,09	0,38±0,07	3,63±0,06	
Spiruline Etika	13,36±0,16	-8,74±0,12	5,7±0,25	
Mélange de poudres	88,72±0,04	2,28±0,02	15,05±0,06	
Sf.R.G#Sas	21,46±0,21	4,07±0,09	11,74±0,1	
Sf.R.OH.V2#Sas	14,66±0,17	-1,65±0,05	7,4±0,11	

L'activité de l'eau des différents ingrédients a une influence directe sur celle du mélange de poudres. Les ingrédients ont une activité d'eau de :

- ⇒ Farine de riz : 0,2-0,4 (Ahmed et al., 2018)
- ⇒ Sucre brun : 0,55-0,65 (Asikin et al., 2016)
- ⇒ Lait en poudre : ±0,2 (Schuck, 2011)
- ⇒ Œuf en poudre : 0,2-0,3 (Obara et al., 2006)

Le mix d'ingrédients secs possède une activité d'eau de 0,494±0,002 (Tableau 35). Il faut toutefois relativiser ces valeurs avec le fait que la conservation des ingrédients n'a pas toujours été optimale. Les ingrédients ont été transférés dans des boîtes en plastiques simplement fermées avec un couvercle et le sucre était stocké dans des endroits légèrement humides à certains moments. Dans des conditions optimales, l' A_w pourrait être plus basse, cela nécessite de réitérer l'étude avec des produits correctement conservés.

Tableau 35 : activité de l'eau du mélange de poudre.

Activité de l'eau				
Mélange de poudres	0,496	0,498	0,494	0,496±0,002

3.3.2. IMPACT DE LA CUISSON

Les résultats du Tableau 36 reprennent une partie des données des deux études précédentes pour pouvoir comparer les informations récoltées.

Tableau 36 : résultats des mesures des gaufres à la spiruline fraîche

Tests	dimension min produit cru froid (cm)	dimension hauteur Max produit cuit (cm) froid	Masse volumique g/cm ³	température °C	poids avant cuisson	poids après cuisson	Pourcentage de réduction de poids
Cf.R.G	/	0,767±0,142	/	83,57±4,39	81,22±0,63	57,5±1,45	29,2±2%
Cf.R.MW.9	1,811±0,025	2,672±0,087	0,577±0,067	94,17±0,67	79,16±0,08	67,21±2,61	15,1±3,21%
Cs.R.G#SMG	/	0,539±0,085	/	92,67±2,42	81,08±0,35	59,52±1,6	26,58±2,15%
Cs.R.MW#SMG	1,706±0,011	2,431±0,127	0,666±0,035	97,1±0,35	79,64±0,16	69,46±0,79	12,78±1,15%
Sf.R.G#Set	/	0,597±0,063	/	83,33±7,39	80,4±0,27	54,28±2,8	32,5±3,27%
Sf.R.G#Sas	/	0,558±0,06	/	87,77±2,25	80,43±0,41	55,71±1,11	30,73±1,72%
Sf.R.MW#Set	1,692±0,045	2,75±0,211	0,582±0,036	98,4±1,4	79,2±0,65	65,5±2,94	17,31±3,05%
Sf.R.MW#Sas	1,622±0,029	2,089±0,169	0,733±0,081	96,93±0,85	78,32±0,54	67,82±1,02	13,41±1,03%
Sf.R.G#Sas2	/	0,572±0,049	/	86,47±1,86	84,17±2,84	54,37±3,27	35,27±6,06%
Sf.R.MW#Sas2	1,658±0,035	2,114±0,085	0,722±0,039	95,3±1,84	78,28±0,75	65,11±2,9	16,84±2,97%
Cs.R.OH.V1#SMG	2,467±0,014	3,175±0,066	1,444±0	99,67±0,5	81,72±0,56	74,83±1,2	8,43±1,94%
Cs.R.OH.V1.5#SMG	2,458±0,014	3,933±0,058	1,045±0	100±0	81,78±0,39	76,77±0,58	6,13±0,59%
Cs.R.OH.V2#SMG	2,517±0,014	3,467±0,252	1,411±0	98,3±1,82	82,27±0,25	77,4±1	5,92±1,17%
Sf.R.OH.V1#Sas	2,3±0	3,533±0,058	1,175±0	99,27±0,46	80±0	71,8±1,18	10,25±1,47%
Sf.R.OH.V1.5#Sas	2,392±0,014	3,608±0,101	1,245±0	96,8±1,47	80±0	74,4±0,86	7±1,07%
Sf.R.OH.V2#Sas	2,35±0,05	3,833±0,058	1,052±0	97,77±1,51	80±0	72,51±0,95	9,36±1,19%

Les températures mesurées dans tous les échantillons ont été distribuées dans la Figure 50. La cuisson étant relativement courte et la pâte contenant presque 50% d'eau, il est difficile d'atteindre des températures supérieures à 100°C. Les données sont relativement peu précises, dû au fait qu'il est impossible, dans ces conditions, de mesurer l'évolution en temps réel de la température. Il aurait été plus intéressant de mesurer les cinétiques de température.

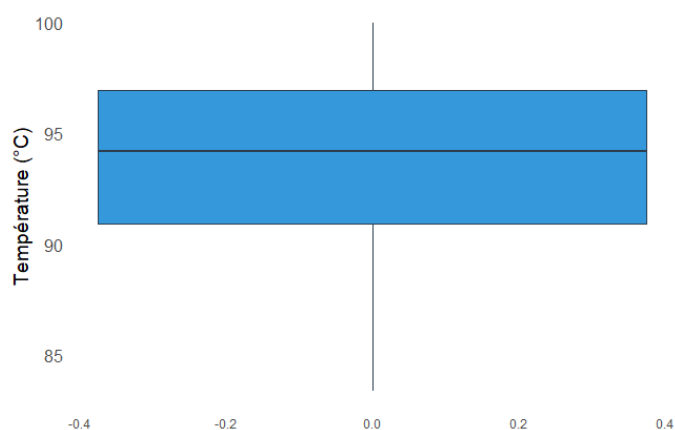


Figure 50 : Distribution des températures atteinte lors de la cuisson des gaufres (tous résultats confondus).

L'évolution de la hauteur des gaufres au cours de la cuisson ohmique (Figure 51) n'est pas influencée par le voltage. Il est toutefois nécessaire de préciser que cela est dû à l'allongement du temps de cuisson lors des voltages à 150V et 100V. Il s'en déduit que, pour la cuisson à 200V, le temps de cuisson est réduit de 5.6 fois ce qui impacte également la consommation d'énergie.

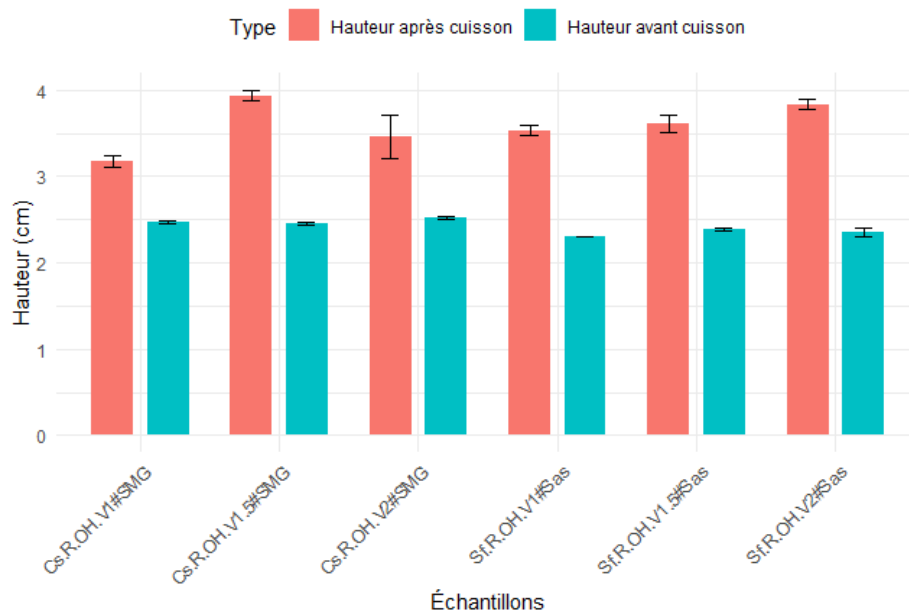


Figure 51 : Evolution de la hauteur à la cuisson des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique

Comparé aux autres résultats d'évolution de la hauteur à la cuisson (Figure 52), une tendance se dessine en faveur de la cuisson ohmique. D'autant que durant la cuisson, le volume de la gaufre croit rapidement et redescend légèrement lorsque que le courant est coupé ; il s'agit d'une similitude avec la cuisson au micro-ondes. Théoriquement, dans l'espace, le produit ne devrait pas s'affaisser après la cuisson, cela reste cependant à prouver.

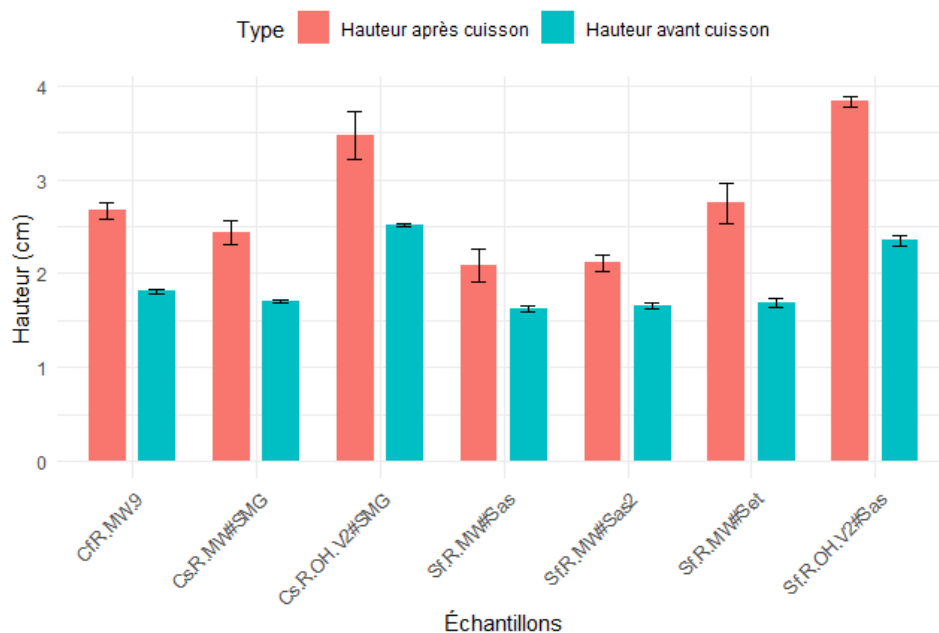


Figure 52 : Evolution de la hauteur à la cuisson des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique et au micro-ondes

Le masse volumique des gaufres cuites au four ohmique (Figure 53) varie assez peu en fonction du voltage. Aucune tendance ne se démarque. Cependant dans la Figure 54, force est de constater que la cuisson ohmique possède un grammage quasi deux fois plus élevé pour le volume. Cela signifie que les gaufres devraient être plus denses avec un volume plus faible, ce qui ne concorde pas avec les résultats de la Figure 52. Toutefois en observant les données de la Figure 56, les pertes en eau lors de la cuisson

ohmique sont inférieures aux autres modes de cuissons, ce qui pourrait expliquer cette différence. Cependant les mesures n'ayant pas été réalisées en triplicata, elles ne peuvent pas être validées statistiquement.

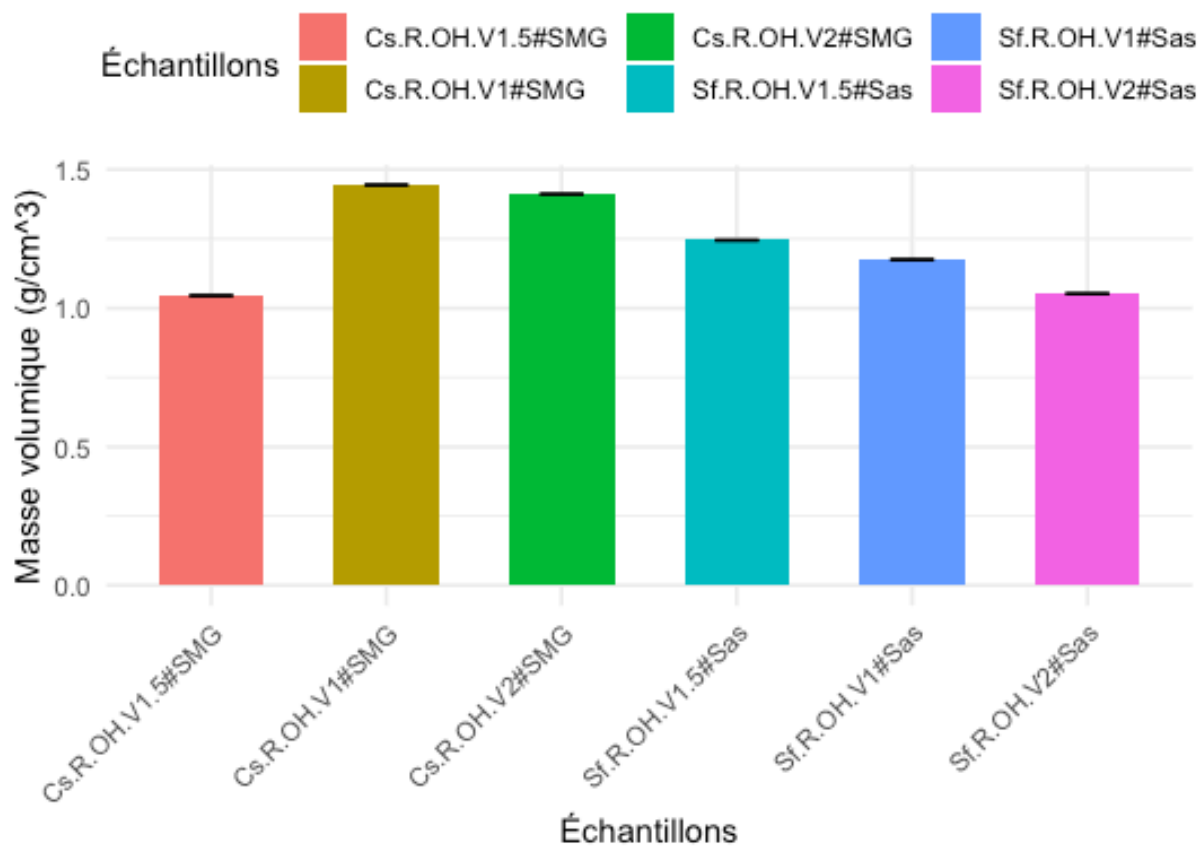


Figure 53 : comparaison des masses volumiques des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique.

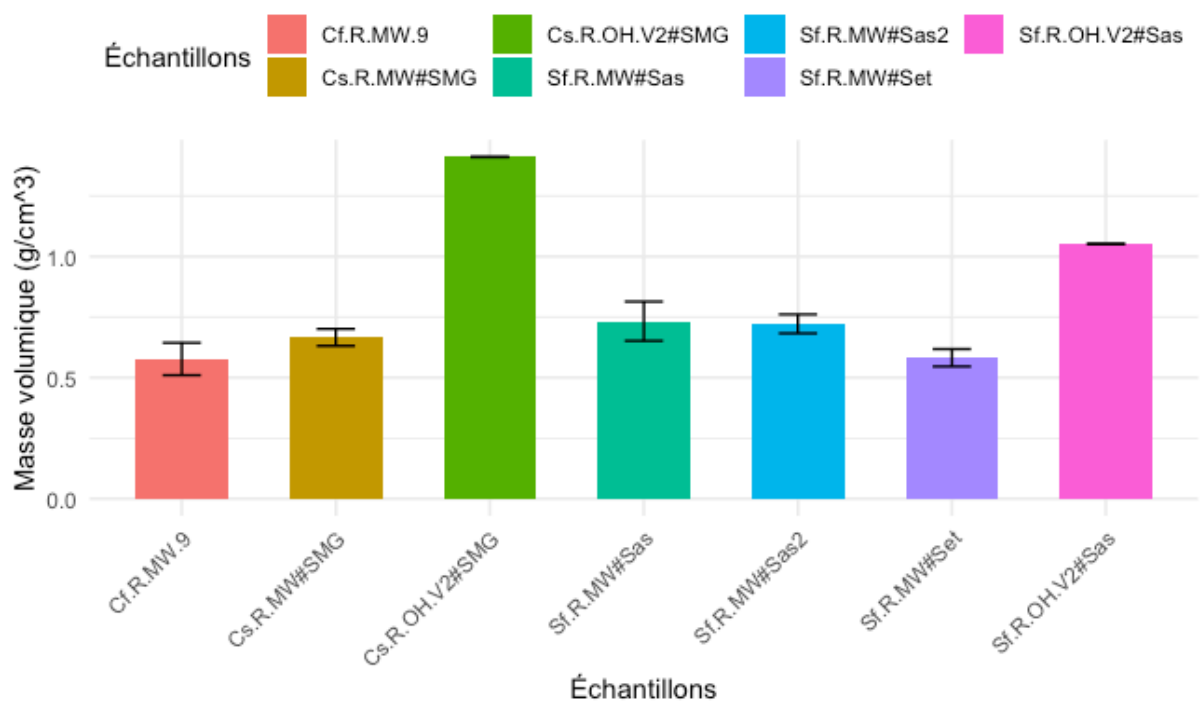


Figure 54 : comparaison des masses volumiques des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique et au micro-ondes.

Le voltage du four ohmique influence très peu le pourcentage de réduction de masse hydrique (Figure 55). Les résultats étant déjà très bas, la variabilité ne peut être expliquée uniquement par le voltage.

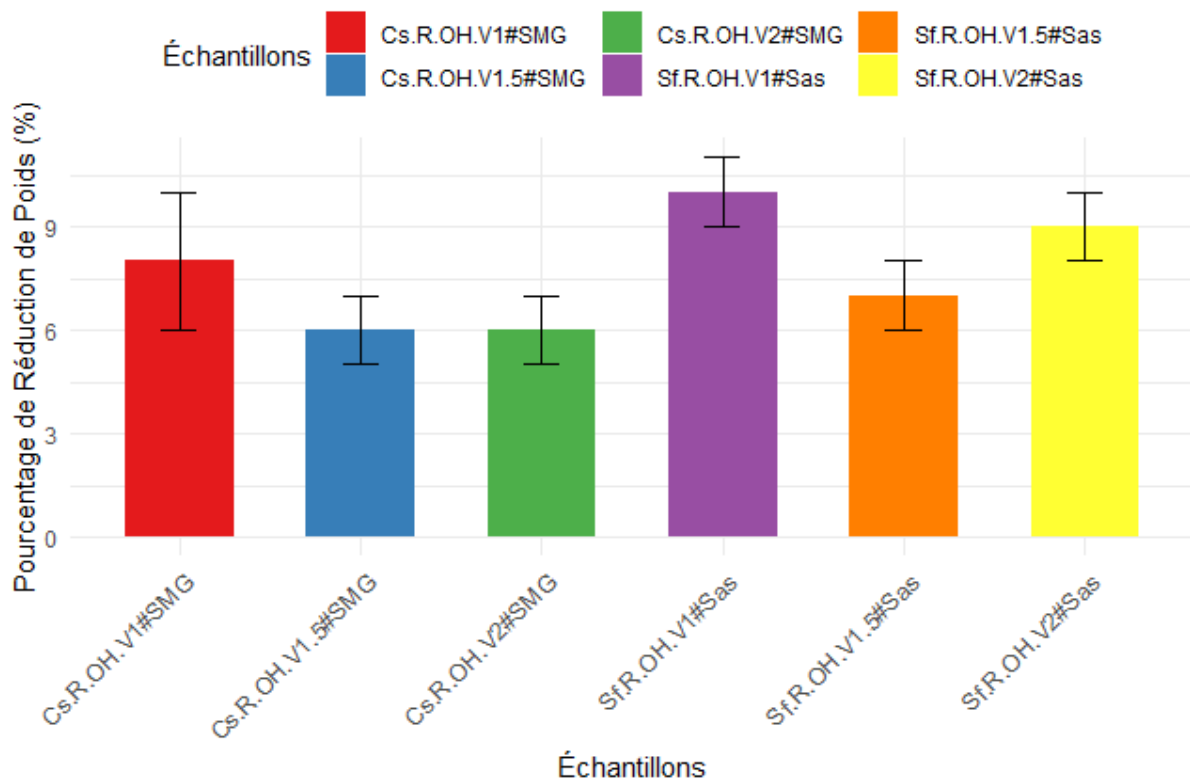


Figure 55 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres à la spiruline cuites au four ohmique.

La Figure 56 montre la variabilité du pourcentage de réduction de poids et la Figure 57 réalise la distribution de ces variabilités. Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour évaluer l'effet du type de cuisson sur le pourcentage de réduction de poids des gaufres ont révélé un effet significatif du type de cuisson sur le pourcentage de réduction de poids ($F(2, 30) = 91.31, p < 0.001$). De plus, l'analyse comparative montre une différence significative dans le pourcentage de réduction de poids entre les gaufres cuites selon la méthode ohmique ou au micro-ondes (différence moyenne de -0,0589, intervalle de confiance à 95% entre -0,1023 et -0,0156, p ajustée = 0,0060322 d'après le test de comparaisons multiples de Tukey). Ceci indique que la méthode de cuisson ohmique induit une réduction de poids significativement plus faible (bien que légère) que la méthode micro-ondes.

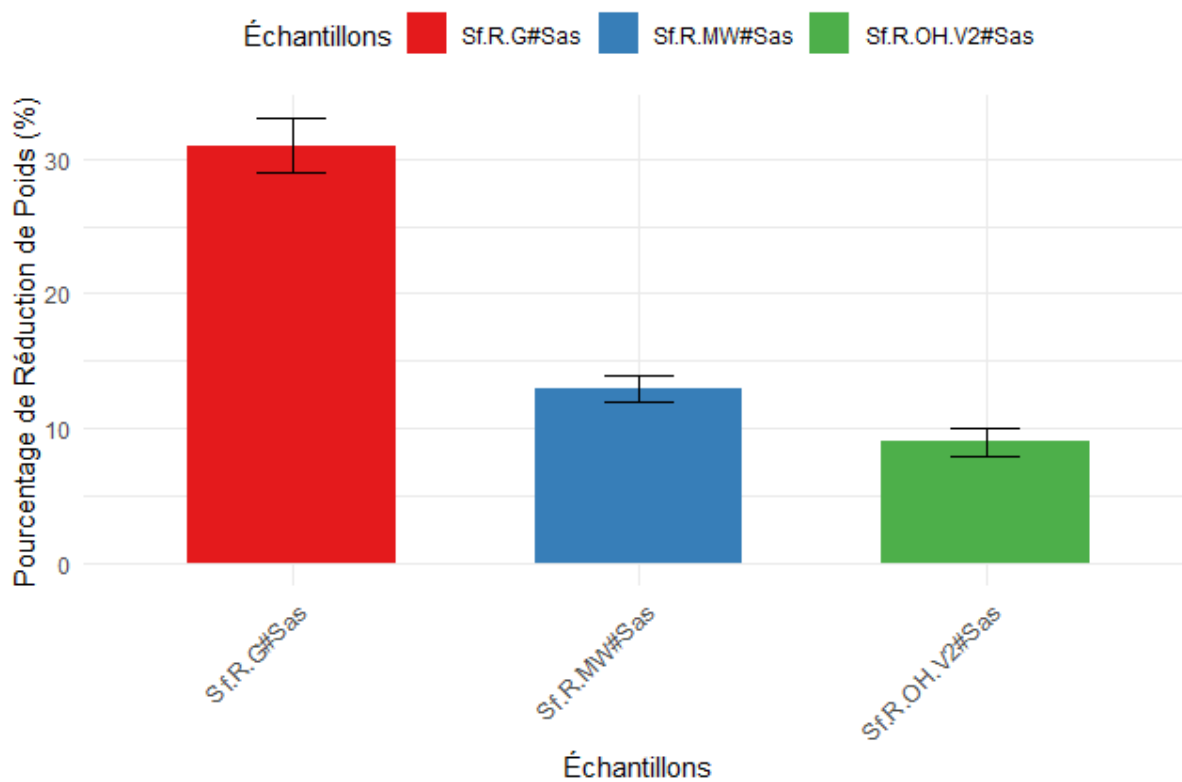


Figure 56 : comparaison du pourcentage de réduction du poids à la cuisson des gaufres à la spiruline AstroFood cuites au four ohmique, au micro-ondes et au gaufrier.

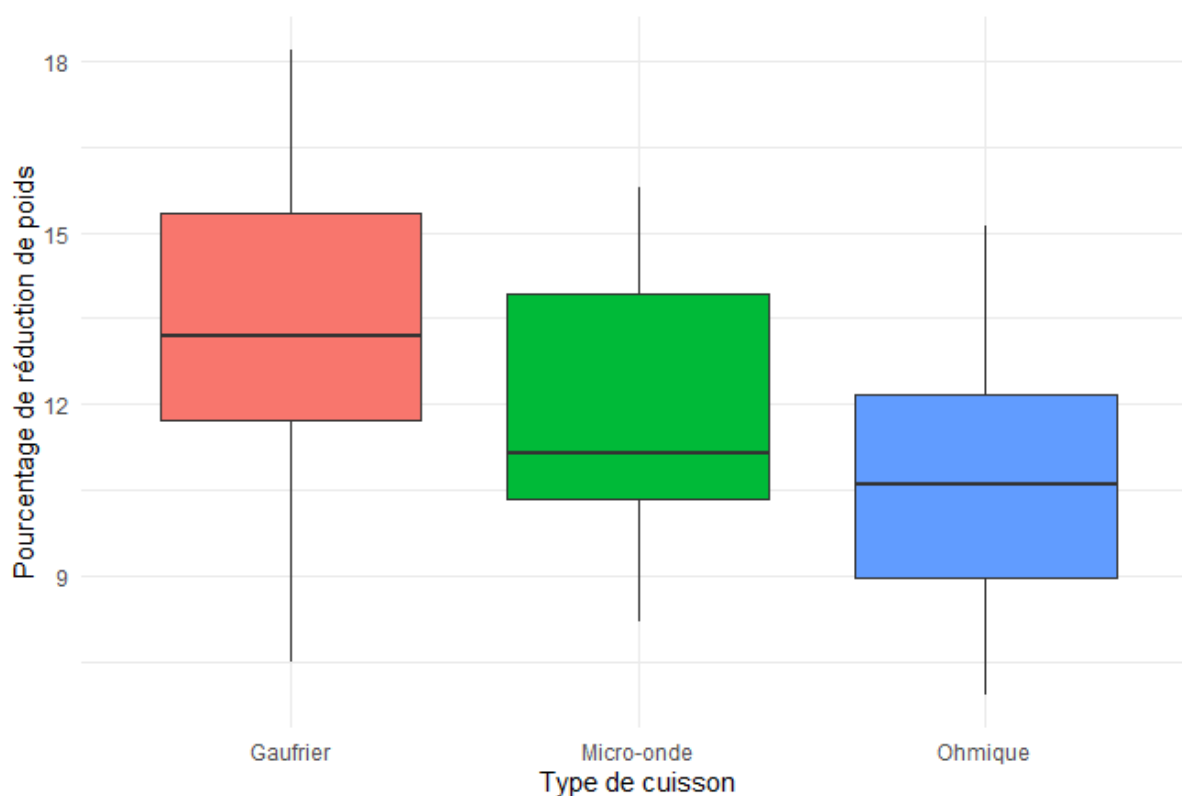


Figure 57 : distribution du pourcentage de réduction de poids par type de cuisson (tous résultats confondus)

3.3.3. SCORE TOTAL DE DÉGUSTATION

L'analyse des STD du Tableau 37 a été effectuée en plusieurs toiles afin de garder une certaine lisibilité des graphiques, au vu du nombre de données. La Figure 58 reprend les échantillons cuits au four ohmique et la Figure 59 compare les meilleurs résultats des études précédentes avec les meilleurs résultats de la cuisson ohmique. Dans la Figure 58, les STD de la cuisine ohmique sont fort regroupés, tous avec des scores élevés. Une légère préférence est tout de même visible pour les gaufres cuites à 200V. La Figure 59 met en évidence le fait que la cuisson ohmique domine les autres méthodes de cuisson. Cependant, l'acceptabilité reste moins bonne que celle de la gaufre du commerce et maison avec des produits frais. Les gaufres cuites au four ohmique obtiennent clairement les meilleurs STD.

Tableau 37 : Résultats des scores totaux de dégustation des gaufres à la spiruline fraîche.

Echantillons	Apparence	Texture	Saveur	Impression score	Acceptabilité score	Total
Com	2	3	0	3	0	5
Cf.R.G	8	8	3	3	3	19
Cf.R.MW.9	2	7	4	3	6	13
Cs.R.G#SMG	9	12	1	3	6	22
Cs.R.MW#SMG	4	4	2	3	6	10
Sf.R.G#Set	5	13	14	12	12	32
Sf.R.G#Sas	4	11,5	2,5	3	6	18
Sf.R.MW#Set	5	9	9	9	12	23
Sf.R.MW#Sas	2	2	4,5	6	7,5	8,5
Sf.R.G#Sas2	3	11	1	3	6	15
Sf.R.MW#Sas2	2	2	0	6	6	4
Cs.R.OH.V1#SMG	1	3	1	6	6	5
Cs.R.OH.V1.5#SMG	1	0	1	3	6	2
Cs.R.OH.V2#SMG	1	0	1	3	6	2
Sf.R.OH.V1#Sas	2	4	0	6	6	6
Sf.R.OH.V1.5#Sas	2	0	0	3	6	2
Sf.R.OH.V2#Sas	2	0	0	3	6	2

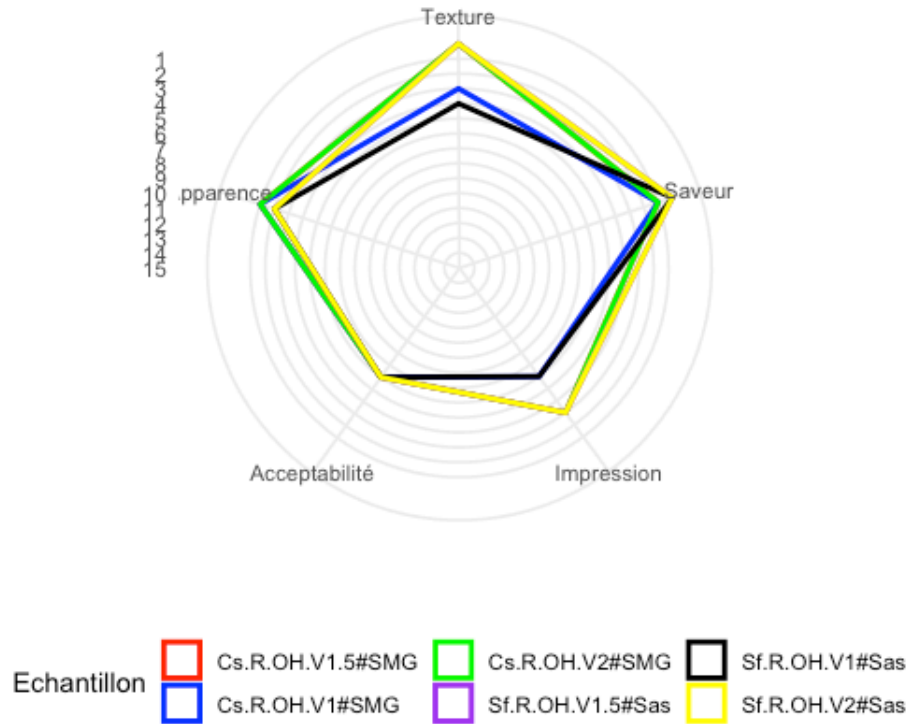


Figure 58 : représentation en toile des STD des gaufres à la spiruline fraîche cuites au four ohmique.

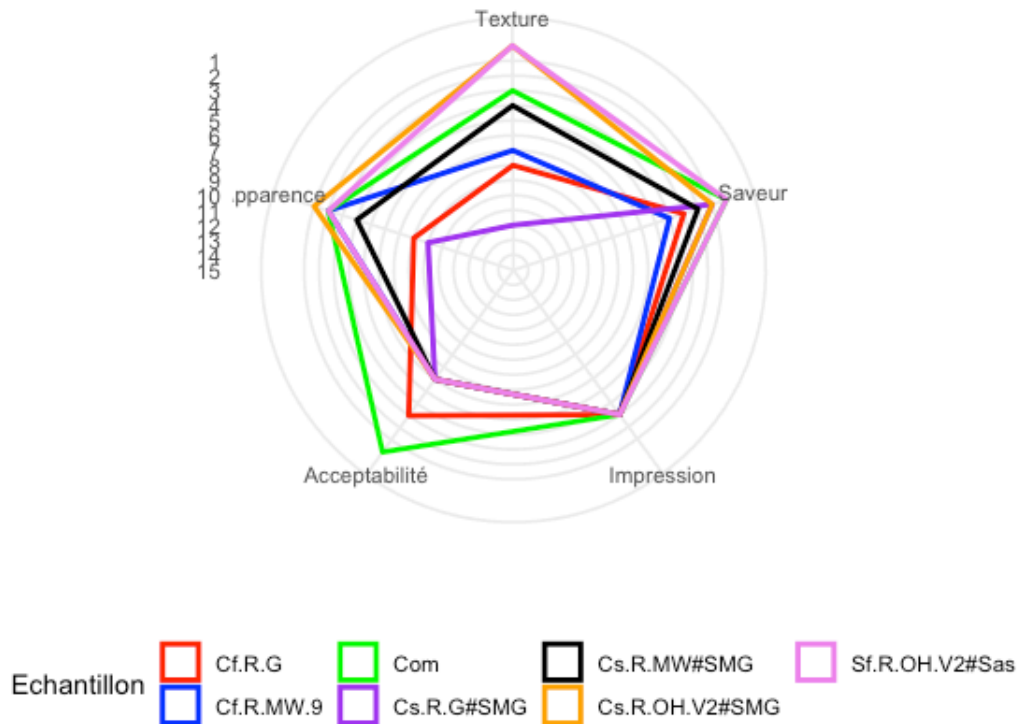


Figure 59 : représentation en toile des STD des gaufres à la spiruline fraîche comparées aux gaufres classiques aux produits frais et aux gaufres classiques aux produits déshydratés.

La distribution des STD en fonction du mode de cuisson et du type de farine (Figure 60) montre une nette différence entre les modes de cuisson, en faveur de la cuisson ohmique.

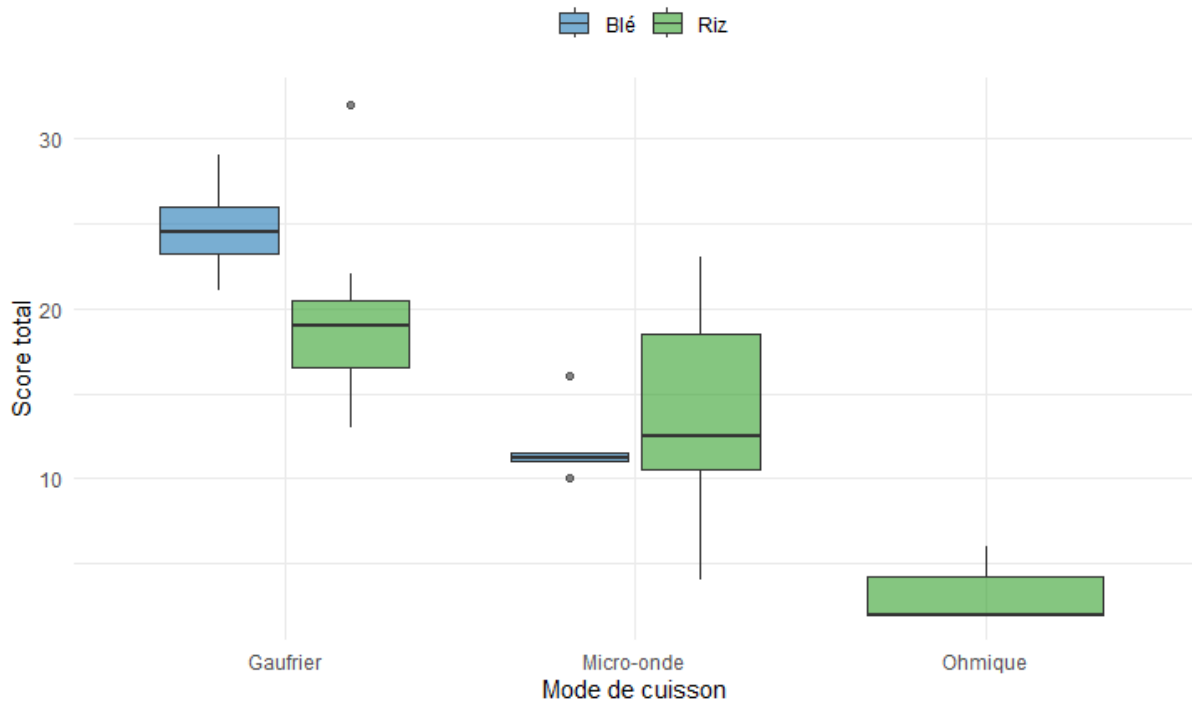


Figure 60 : distribution des STD en fonction du mode de cuisson et du type de farine (tous résultats confondus)

Ensuite, une comparaison des scores totaux obtenus pour tous les produits à base de farine de riz et de farine de blé a été réalisée à l'aide du test de Wilcoxon-Mann-Whitney. Les résultats indiquent que les scores totaux entre les deux types de farine ne présentent pas de différence significative ($p = 0.05339$). Bien que la différence puisse tendre vers la significativité, il n'y a pas suffisamment de preuves pour conclure à un décalage significatif dans les scores totaux entre les deux types de farine.

La Figure 61 montre la distribution de l'acceptabilité et des STD en fonction du type de gaufre (avec des produits frais, séchés ou à base de spiruline). Une relation inverse entre ces deux paramètres peut être observée, l'acceptabilité des gaufres maisons est meilleure malgré un STD moins bon. La catégorie de gaufre à base de spiruline fraîche pourrait être divisée en deux en fonction de la société productrice car les scores d'Etika sont bien moins bons que ceux d'AstroFood, ce qui étend la distribution.

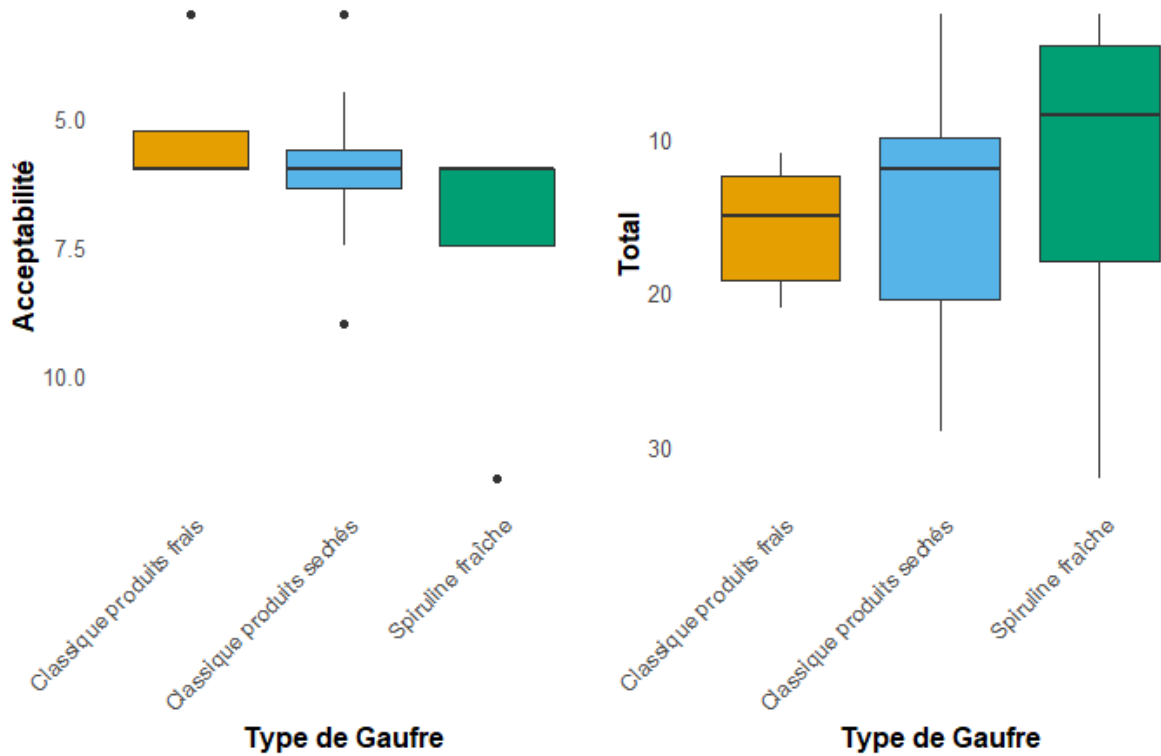


Figure 61 : impact de la spiruline fraîche sur l'acceptabilité du produit et sur le STD.

La spiruline a un impact sur la couleur du produit. La biomasse d'AstroFood est plus foncée et cela se répercute sur la couleur de la gaufre, tandis que la spiruline d'Etika est plus claire. Cette observation est visible sur les Figure 62 et Figure 63.



Figure 62 : Photo de la cuisson des gaufres Sf.R.B#Sas à gauche et Sf.R.B#Set à droite

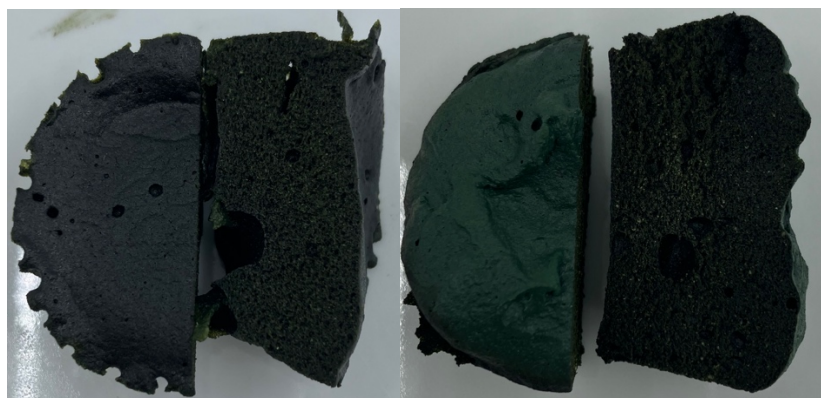


Figure 63 : Photo de la cuisson des gaufres Sf.R.MW#Sas à gauche et Sf.R.MW#Set à droite

3.3.4. ANALYSES DE LA TEXTURE

Les données texturométriques du Tableau 38 sont exprimées sous forme de diagramme en bâtonnet dans la Figure 64 pour la cuisson au four ohmique, et dans la Figure 65 pour comparer les résultats entre les meilleures productions de chaque étude. La spiruline semblerait jouer un rôle sur la dureté, la masticabilité et la fracture du produit, rendant le produit plus fragile. En comparaison aux autres résultats, la gaufre Sf.R.OH.V2#Sas se trouve dans la même fourchette que les autres productions.

Tableau 38 : Données texturométriques des gaufres à la spiruline fraîche.

nom échantillon	diamètre rond texturo	Dureté (N)	Masticabilité (N)	Fracture (N)	Hauteur (mm)
Com	4,581±0,039	15,33±2,42	8,26±0,66	7,18±2,65	10,89±1,31
Cf.R.G	4,606±0,14	25,26±7,21	16,62±5,84	22,21±7,03	7,88±0,98
Cf.R.MW.9	4,15±0,265	24,68±2,11	14,29±1,5	24,39±1,93	24,09±0,23
Cs.R.G#SMG	4,539±0,086	19,65±4,43	12,87±4,11	13,58±6,59	5,86±0,48
Cs.R.MW#SMG	3,942±0,014	21,05±4,97	12,15±3,42	20,76±4,91	22,4±0,56
Sf.R.MW#Set	4,292±0,101	29,28±22,83	12,08±11,07	29,09±22,75	27,17±3,11
Sf.R.MW#Sas	4,125±0	18,97±2,77	9,66±1,82	18,89±2,74	20,64±0,33
Sf.R.G#Set	4,678±0,096	26,58±11,32	15,02±7,06	12,57±4,57	7,1±0,54
Sf.R.G#Sas	4,603±0,054	17,21±3,44	10,36±2,32	9,07±3,4	5,89±0,71
Sf.R.G#Sas2	4,561±0,078	14,12±2,19	8,03±1,59	11,36±3,32	6,32±0,84
Sf.R.MW#Sas2	4,067±0,058	26,02±3,07	13,37±2,13	25,5±3,39	20,6±1,24
Cs.R.OH.V1#SMG	4,175±0,025	31,02±4,01	15,86±3,75	30,65±4,01	26,32±1,69
Cs.R.OH.V1.5#SMG	4,233±0,029	44,07±5,8	28,75±3,87	43,5±5,9	23,25±1,07
Cs.R.OH.V2#SMG	4,183±0,076	39,86±9,91	25,03±6,18	39,47±9,63	23,34±0,9
Sf.R.OH.V1#Sas	4,183±0,076	32,14±5,96	18,61±3,38	31,85±5,91	30,48±1,3
Sf.R.OH.V1.5#Sas	4,208±0,038	23,16±3,35	12,64±2,23	22,75±3,03	31,4±1,56
Sf.R.OH.V2#Sas	4,167±0,058	23,23±5,46	12,34±3,46	22,84±5,4	31,69±3,3

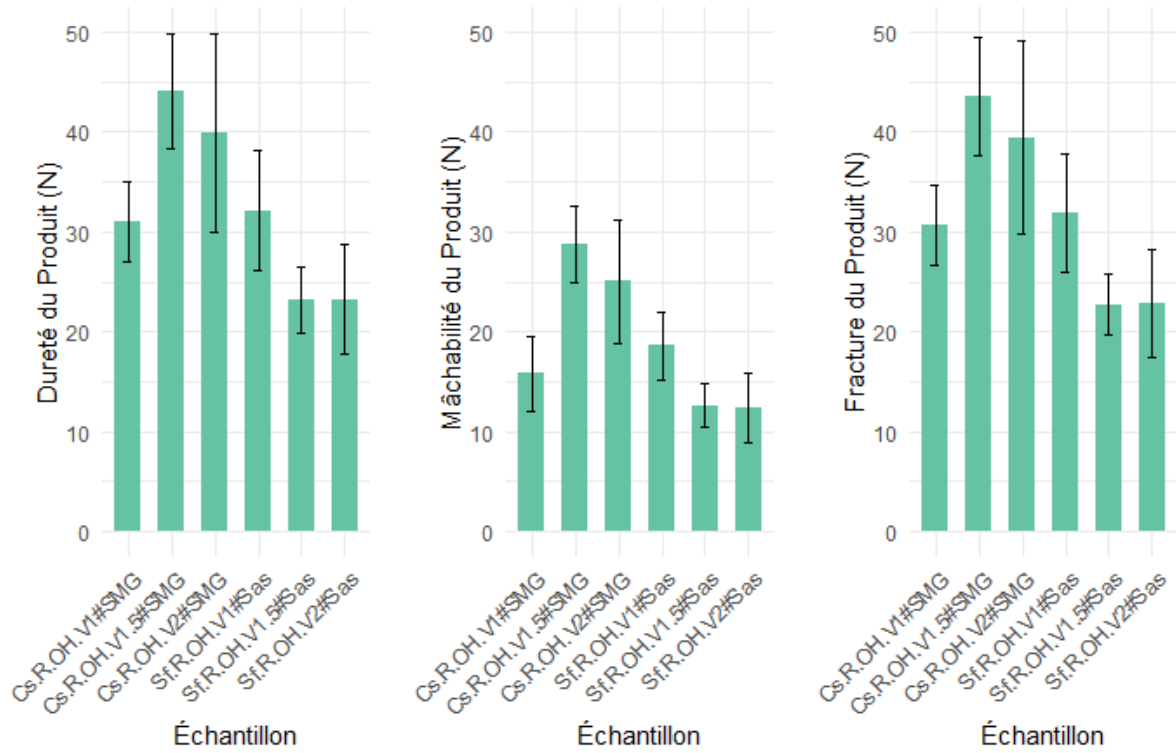


Figure 64 : diagramme de la dureté, de la masticabilité et de la fracture des gaufres à la spiruline fraîche cuites au four ohmique.

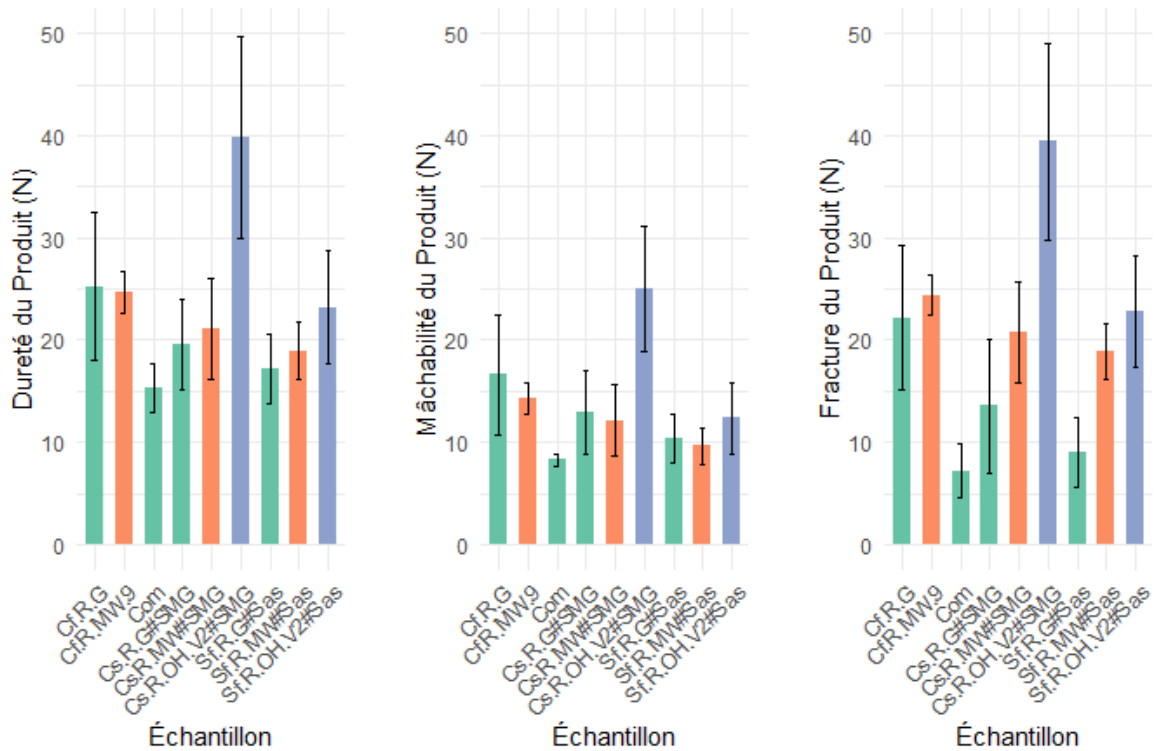


Figure 65 : diagramme de la dureté, de la masticabilité et de la fracture des gaufres à la spiruline fraîche en comparaison aux gaufres classiques.

La Figure 66 permet d'observer certaines différences en comparant les données des trois cuissons. Pour le paramètre de dureté, les résultats de l'ANOVA ne montrent pas de différence significative entre les méthodes de cuisson ($F = 8.281$, $p = 0.00131$). En ce qui concerne la masticabilité, une différence significative a été observée entre les méthodes de cuisson ($F = 6.755$, $p = 0.00367$). Pour le paramètre de fracture, une différence très significative a été mise en évidence entre les méthodes de cuisson ($F = 20.38$, $p < 0.001$). La cuisson ohmique semble avoir des résultats plus élevés mais cela est essentiellement dû grâce à la texture des productions de gaufres Cs.R.OH(V1, V1.5, V2)#SMG, comme observé dans la Figure 65.

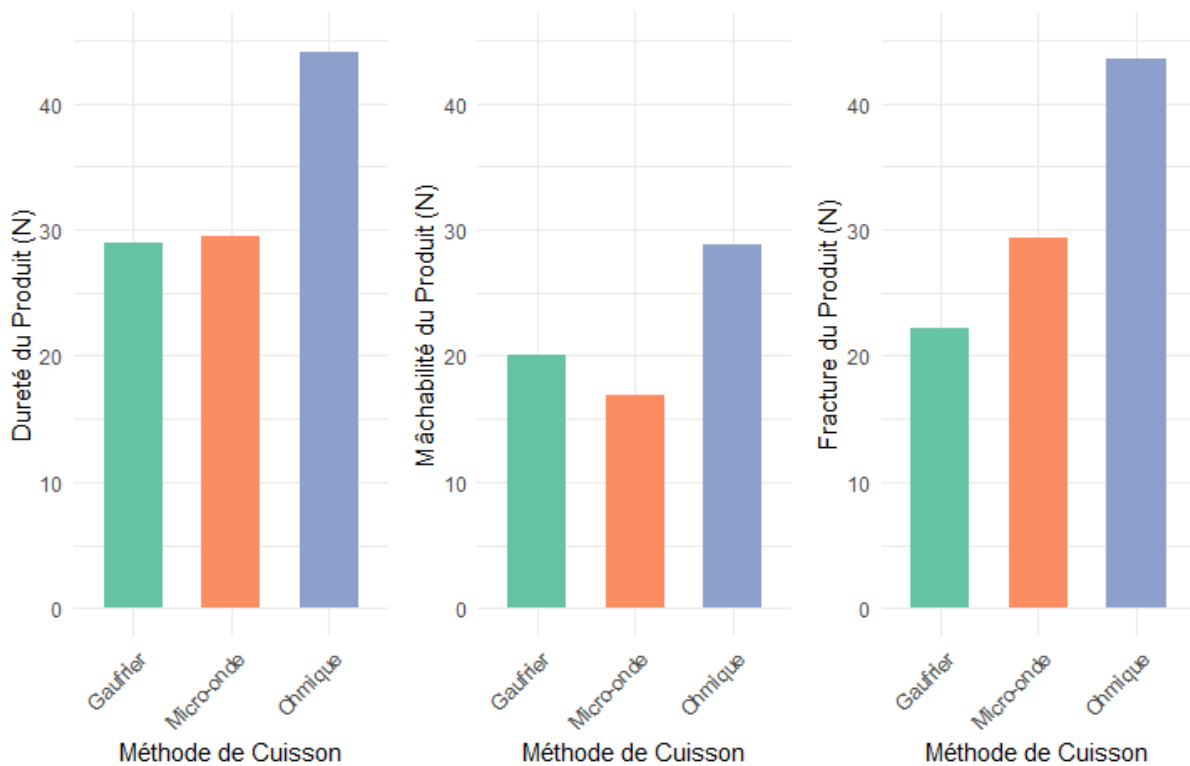


Figure 66 : Influence de la dureté, de la masticabilité et de la fracture du produit en fonction du mode de cuisson (tous résultats confondus)

Selon les études précédentes, une différence significative est observée entre les gaufres à base de farine de riz et de blé (Figure 67).

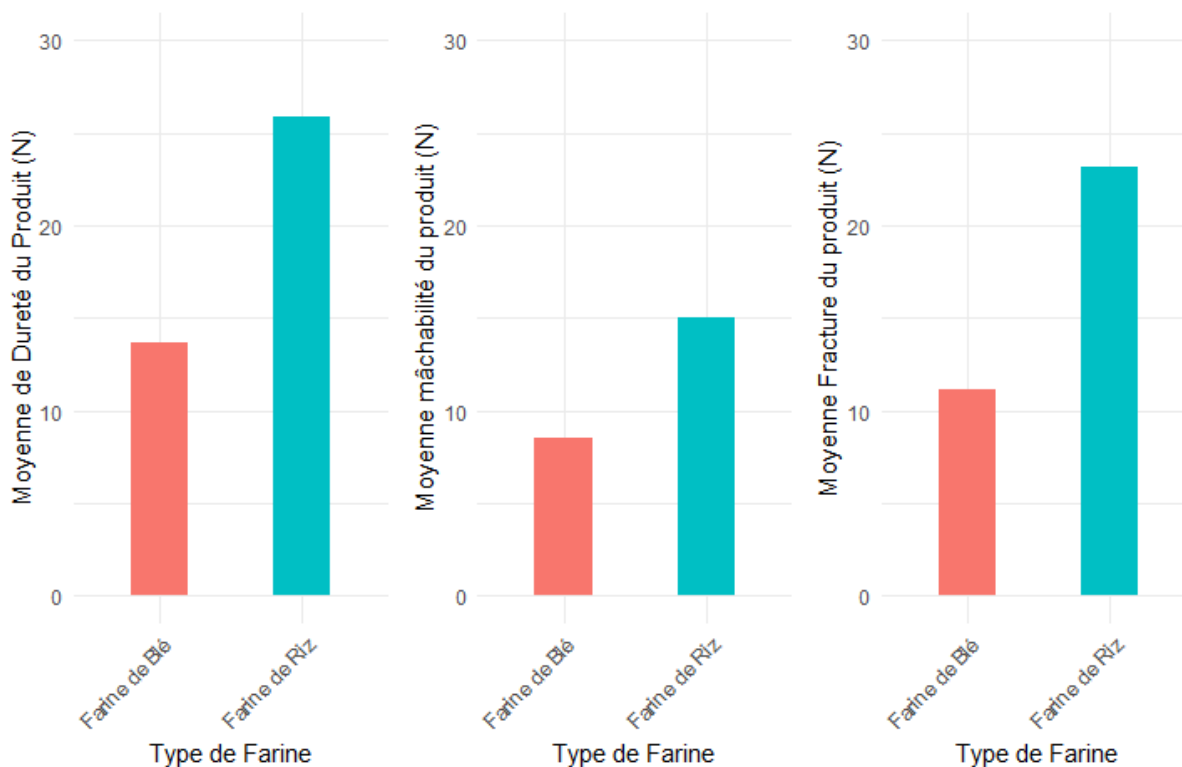


Figure 67 : Influence de la dureté, de la masticabilité et de la fracture du produit en fonction du type de farine (tous résultats confondus).

3.3.5. CINÉTIQUE DE TEMPÉRATURE ET DE CONDUCTIVITÉ DE LA CUISSON OHMIQUE

Les cinétiques de cuisson du Tableau 39 ont été figurées dans des graphiques en courbe pour visualiser la montée en température (Figure 68), la conductivité (Figure 69) et la corrélation entre la température et la conductivité (Figure 70). Plus le voltage est faible, plus la température met du temps à s'élever. Dans chaque cuisson, la conductivité augmente avec la température, jusqu'à atteindre le changement de phase qui engendre une diminution de la conductivité malgré une température élevée constante.

La spiruline semblerait diminuer la conductivité du produit. Un décalage entre la gaufre à base de produits séchés et la gaufre à base de spiruline est observable sur tous les graphiques. La conductivité étant plus basse, la montée en température se fait plus lentement et le pic de conductivité (au changement de phase) est décalé vers la droite comparée à son homologue sans spiruline.

Le test de corrélation de Pearson révèle également une corrélation positive modérée et statistiquement significative entre la température et la conductivité dans l'échantillon (corrélation de Pearson = 0.645, $p < 0.001$). Cette relation suggère que l'augmentation de la température est associée à une augmentation de la conductivité.

Tableau 39 : cinétique de température et de conductivité de la cuisson ohmique sur les gaufres Cs.R.OH#SMG et Sf.R.OH#Sas en fonction du voltage.

Temps	Température (°C)	Conductivité	Température (°C)	Conductivité
	Cs.R.OH.V1#SMG		Sf.R.OH.V1#Sas	
0'00''	26,1±0,4	0,7±0,1	21,6±1,2	0,6±0
3'00''	62,9±4,1	1,7±0,2	53±3,6	1,3±0,1
4'00''	-	2,1±0,1	-	1,5±0

5'00''	93,4±4,2	1,7±0,1	84,2±1,9	1,7±0,1
6'00''	-	1,3±0	-	1,4±0,1
8'00''	98,6±0,5	1,1±0,1	99,3±0,5	1,2±0,1
Cs.R.OH.V1.5#SMG			Sf.R.OH.V1.5#Sas	
0'00''	25,6±0,1	0,8±0	20,8±1,9	0,6±0
1'50''	82,3±5,5	2,2±0	71,9±5,8	1,7±0,1
2'30''	99,3±0,3	1,4±0,1	92,3±1	1,4±0,1
3'00''	99,9±0,2	1,3±0,1	96,8±1,5	1,4±0,1
Cs.R.OH.V2#SMG			Sf.R.OH.V2#Sas	
0'00''	25,4±0,5	0,8±0	22,7±0,5	0,6±0,1
0'50''	75,3±1,5	2,2±0	60±2	1,5±0,1
1'00''	-	1,9±0,1	-	1,7±0,1
1'25''	98,1±0,8	1,4±0	93,8±3,7	1,4±0,1
1'40''	-	-	97,8±1,5	1,3±0

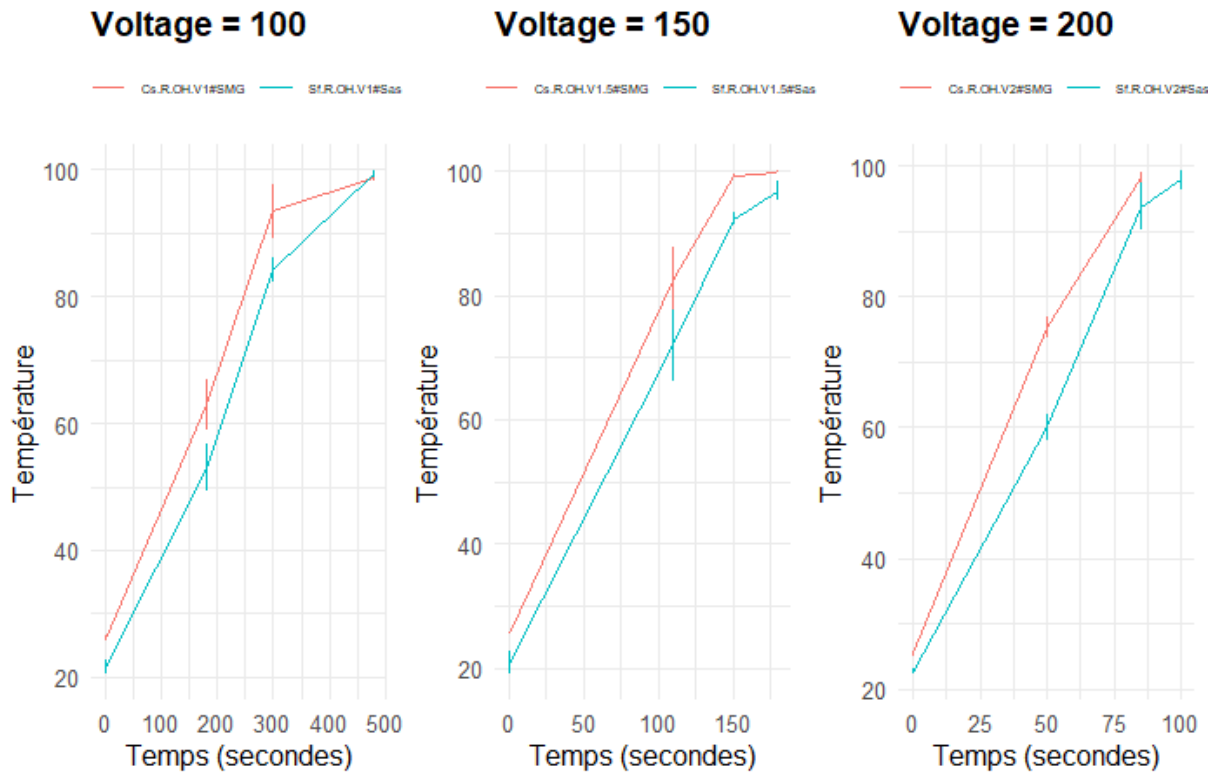


Figure 68 : évolution des température des gaufres cuites au four ohmique dans le temps en fonction du voltage.

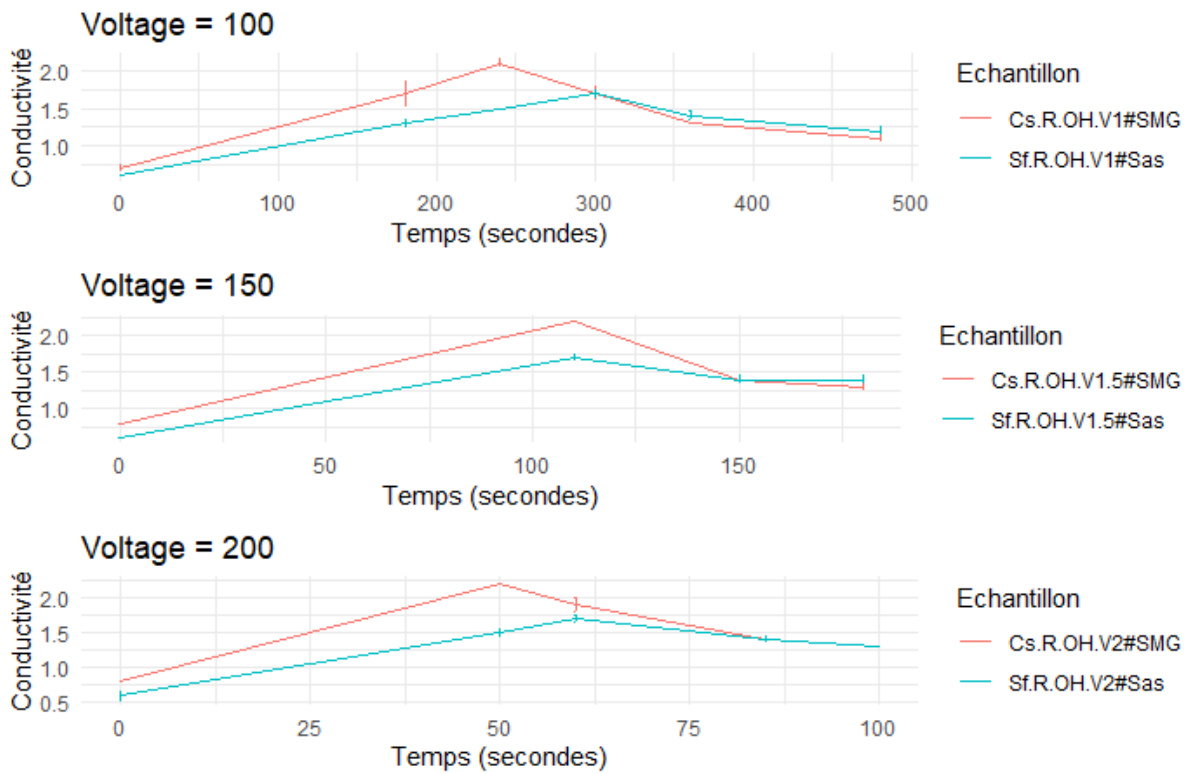


Figure 69 : évolution de la conductivité des gaufres cuites au four ohmique dans le temps en fonction du voltage.

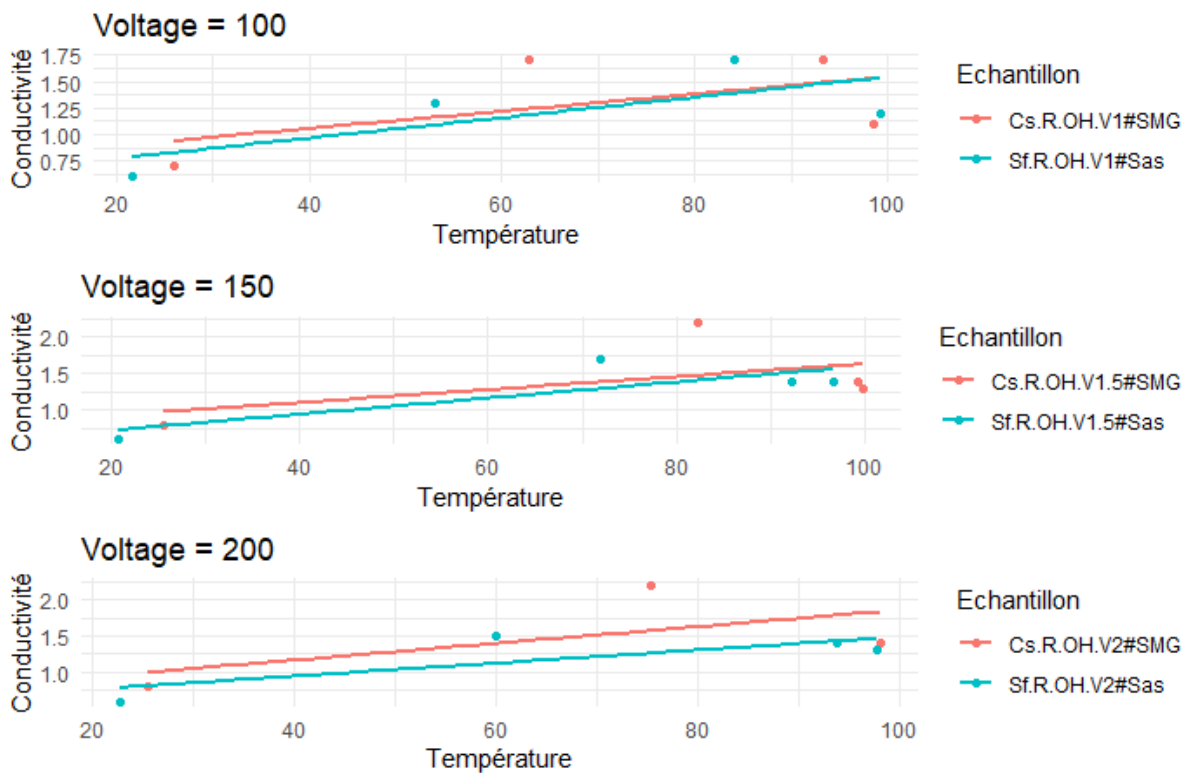


Figure 70 : corrélation entre la température et la conductivité durant la cuisson des gaufres au four ohmique

3.3.6. ANALYSES DES COMPOSÉS AROMATIQUES

Les principaux composés organiques volatils (COV) identifiés dans les échantillons sont présentés dans le Tableau 40.

Il convient de commencer par aborder les gaufres ; le développement d'arômes dans les produits de boulangerie peut être attribué à des composés volatils, strictement liés à la formulation du produit et au processus de fabrication (Mendez, 2016).

Un ensemble de 5 COV a été identifié dans les deux échantillons analysés (CSRG et SFRG), comprenant des aldéhydes, un furane et une cétone.

En ce qui concerne la concentration d'aldéhydes, le 3-méthylbutanal, le 2-méthylbutanal et le 2-méthylpropanal étaient présents dans les deux échantillons, avec des niveaux légèrement plus élevés dans la gaufre classique (Tableau 40). La présence de ces composés volatils dans les gaufres peut être attribuée à un processus de dégradation connu sous le nom de la réaction de Strecker : un processus chimique qui implique la formation de composés aromatiques à partir d'acides aminés en présence de chaleur et d'autres facteurs réactifs (Schonberg et al., 1952; Broyart, 1998). D'après Fors (1983) et Beal et Mottram, (1994) les composés tels que le 2-méthylbutanal, le 3-méthylbutanal et le 2-méthylpropanal sont typiquement associés à la dégradation de Strecker. Les résultats concordent avec l'étude de Buttery et al. (1999), qui a révélé la présence modérée des aldéhydes de dégradation de Strecker dans des galettes de riz. Ces composés volatils contribuent aux arômes caractéristiques de noisette, de café, de chocolat ou de malt.

Le 2-méthylfurane n'a été détecté que dans l'échantillon CSRG. Il pourrait être attribué aux réactions de dégradation ou de transformation chimique qui se produisent lors de la cuisson, notamment la réaction de Maillard (Buttery et al., 1999) qui apporte des notes de cacao, d'amande ou de café.

Un autre composé volatil, également lié à la réaction de Maillard, a été détecté dans l'échantillon SFRG : le 3-hydroxy-2-butanone (Canali et al., 2020). Cette cétone est associée à des arômes évoquant des nuances beurrées, crémeuses ou laiteuses.

Le profil sensoriel de deux gaufres CSRG et SFRG est présenté sous forme de diagramme en toile d'araignée dans la Figure 71.

Tableau 40 : Principaux composés organiques volatils (COV) identifiés dans la spiruline fraîche d'Etika (Spiruline ET), la spiruline fraîche d'Astrofood (spiruline As), la spiruline sèche d'Etika (ETS), des gaufres Cs.R.G#SMG (CSRG) et Sf.R.G#Sas (SFRG) (% de surface > 5 %) avec leur description aromatique et leur seuil de perception.

Classe	Composés	Numéro CAS	RI*	RI Lit**	Seuil de perc.	OAV***	Description des aromes	Ech.
Aldéhyde	2-méthylbutanal	96-17-3	647	641	10	334,01	cacao moisi, phénol, café, noisette, malté, fermenté, gras, alcoolisé	CSRG
	3-méthylbutanal	590-86-3	640	650	50,5	84,20	Ethéré, aldéhydé, chocolat, pêche, gras	CSRG
	2-méthylpropanal	78-84-2	599	552	7,5	123,36	Vert floral aldéhydé frais	CSRG
Furane	2-méthyl-furane	534-22-5	616	603	30	6,66	cacao vert noisette amande café	CSRG
Aldéhyde	2-méthylbutanal	96-17-3	647	641	10	287,54	cacao moisi, phénol, café, noisette, malté, fermenté, gras, alcoolisé	SFRG
	3-méthylbutanal	590-86-3	640	650	50,5	76,95	Éthéré, aldéhydé, chocolat, pêche, gras	SFRG

Classe	Composés	Numéro CAS	RI*	RI Lit**	Seuil de perc.	OAV***	Description des aromes	Ech.
Cétone	2-méthylpropanal	78-84-2	599	552	7,5	104,69	Vert floral aldéhydé frais	SFRG
	3-hydroxy-2-butanone	513-86-0	692	720	32	17,42	Doux, crémeux, beurré, laiteux et gras	SFRG
Alcool	1-Hexanol	111-27-3	874	867	20	5,16	Vert, fruité, peau de pomme et huileux	Spiruline AS
Ester	Méthyl dodécanoate	111-82-0	1526	1526	20	116,44	Cireux, savonneux, crémeux, noix de coco, avec des nuances de champignons	Spiruline AS
	Ethyl Acétate	141-78-6	620	612	100	5,00	Etherial, fruité, sucré, rappelant le raisin et le rhum	Spiruline AS
Alcool	1-Hexanol	111-27-3	874	867	20	9,88	Vert, fruité, peau de pomme et huileux	Spiruline ET
	Methanethiol	74-93-1	578	464	1	2,00	Huile végétale, alliagée, eggy, crémeuse aux nuances salées	Spiruline ET
Cétone	2,3-Butanedione	431-03-8	610	596	50	3,70	Doux, crémeux, beurré, piquant, avec une nuance caramélisée piquante	Spiruline ET
	3-hydroxy-2-Butanone	513-86-0	702	720	32	2,09	Doux beurre crémeux lait laiteux gras	Spiruline ET
Ester	Méthyl dodécanoate	111-82-0	1534	1526	20	26,51	Cireux, savonneux, crémeux, noix de coco, avec des nuances de champignons	Spiruline ET
	Ethyl Acétate	141-78-6	621	612	100	1,92	Etherial, fruité, sucré, rappelant le raisin et le rhum	Spiruline ET
Cétone	Alpha Ionone	127-41-3	1462	1427	12	2,10	Doux boisé floral violette iris tropical fruité	Spiruline ETS
	Isophorone	78-59-1	1058	1118	30	13,46	Rafraîchissant, boisé, doux, vert, camphré, fruité et moisi	Spiruline ETS
Alcool	3-méthyl-1-Butanol	123-51-3	712	734	50	3,12	Fusel, alcoolisé, piquant, éthéré, cognac, fruité, banane et mélasse	Spiruline ETS
	1-Hexanol	111-27-3	866	867	20	32,30	Vert, fruité, peau de pomme et huileux	Spiruline ETS
	2-méthyl-1-Propanol	78-83-1	627	622	50	1,39	Cortex vineux éthéré	Spiruline ETS
	Methanethiol	74-93-1	578	464	1	40,33	Huile végétale, alliagée, eggy, crémeuse aux nuances salées	Spiruline ETS
Aldéhyde	Beta-cyclocitral	432-25-7	1296	1226.1	100	4,04	safran tropical à base de plantes propre oxyde de rose tabac doux damascone fruité	Spiruline ETS
	Hexanal	66-25-1	792	799	2,5	62,78	Vert, boisé, végétatif, pomme, herbacé, agrumes et orange avec un arrière-goût frais et persistant	Spiruline ETS
	Safranal	116-26-7	1209	1206	1	76,12	Frais à base de plantes phénolique métallique romarin tabac épicé safran	Spiruline ETS
	2-méthylPropanal	78-84-2	600	552	7,5	5,28	vert floral aldéhydé frais	Spiruline ETS
Furane	2-méthyl- Furane	534-22-5	616	603	30	10,89	Cacao, chocolat	Spiruline ETS
	2-pentyl- Furane	3777-69-3	990	993.8	15	96,03	Fruité, vert, terreux avec des nuances végétales	Spiruline ETS

*RI : Indices de rétention sur la colonne HP-5MS

**RI allumé : indices de rétention de la littérature rapportés pour la colonne capillaire HP-5MS non polaire

***OAV : Odour activity value (= concentration/ seuil de perception).

Selon les espèces, la culture et les conditions environnementales, les microalgues sont capables de produire une variété de COVs. L'identification des composants volatils des différentes spirulines est présenté dans le tableau 40. un total de 16 composés volatils ont été identifiés dans les échantillons étudiés, les aldéhydes, les alcools et les cétones étant les groupes les plus abondants.

Malgré les données bibliographiques évoquant la production d'arômes indésirables tels que la géosmine et le 2-méthylisobornéol par les cyanobactéries et qui sont souvent associés à des goûts terreux ou de moisissure (Watson et al., 2000; Steinke et al., 2002), ces composés n'ont pas été identifiés dans le cadre de la présente étude.

Pour la spiruline "As", trois composés volatils ont été identifiés, dont les esters prédominent. Ces esters apportent des notes aromatiques variées telles que cire, savon, crème, noix de coco, éthéré, fruité et sucré.

Pour la spiruline "Et", six composés volatils ont été identifiés, comprenant deux alcools, deux cétones et deux esters. Les alcools apportent des notes d'arômes fruités, huileux et crémeux avec des nuances salées; les esters peuvent ajouter des notes d'arômes fruités et sucré; tandis que, les cétones apportent des notes crémeuse, beurrée, caramélisée, piquante et laiteuse. Ces derniers sont générés principalement par oxydation lors de la dégradation des acides gras insaturés (Fiddaman et al., 1994) et leur formation peut être favorisée par des facteurs tels que la chaleur, la lumière ou l'exposition à l'oxygène.

Pour la spiruline "Ets", douze composés volatils distincts ont été identifiés. Parmi ceux-ci, on trouve quatre alcools, quatre aldéhydes, deux cétones et deux furanes.

La présence de ces molécules, notamment les aldéhydes (beta cyclocitral, le safranal, hexanal, 2-méthyl-1-propanal) et les cétones (alpha ionone) sont soit lié à l'oxydation d'acides gras polyinsaturés par des réactions enzymatiques (Fiddaman et al., 1994) et en présence de la chaleur ou lié à la dégradation des caroténoïdes (Silva Ferreira et al., 2008; Nouri et al., 2018).

La Figure 72 représente le profil aromatique de différentes spirulines. Les résultats mettent en évidence que les méthodes de séchage ont un effet significatif et défavorable sur le profil aromatique de la spiruline (Nouri et al., 2018). Les composés aromatiques présents dans la spiruline sont sensibles à la chaleur et peuvent subir des réactions chimiques qui modifient leur structure et leurs propriétés odorantes. Ces réactions peuvent entraîner des pertes, des transformations ou la formation de nouveaux composés aromatiques indésirables à des concentrations faibles (Frankel, 2005).

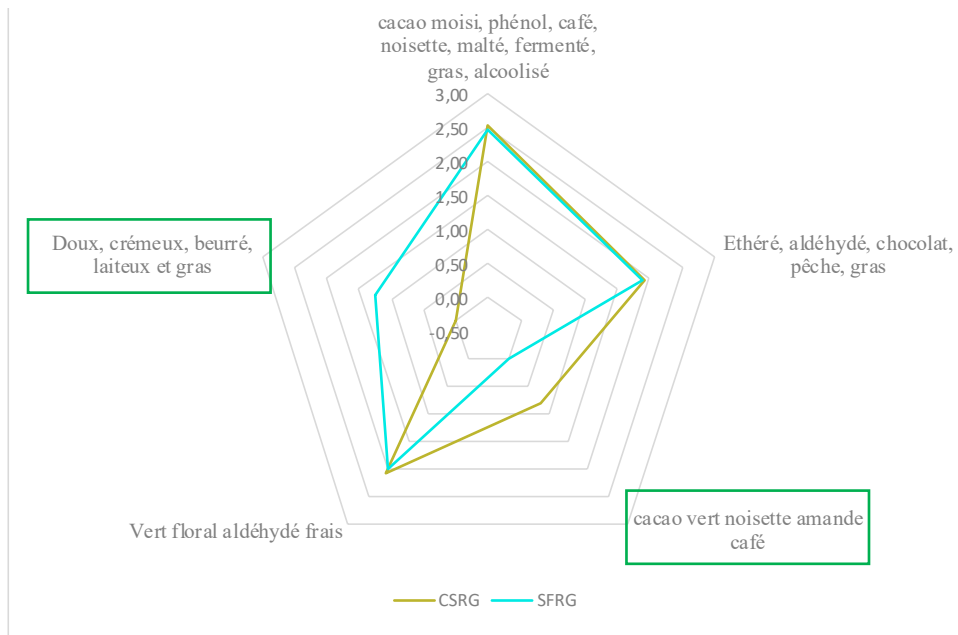


Figure 71 : Profil aromatique des gaufres Cs.R.G#SMG (CSRG) et Sf.R.G#Sas (SFRG) exprimée en log de l'OAV.

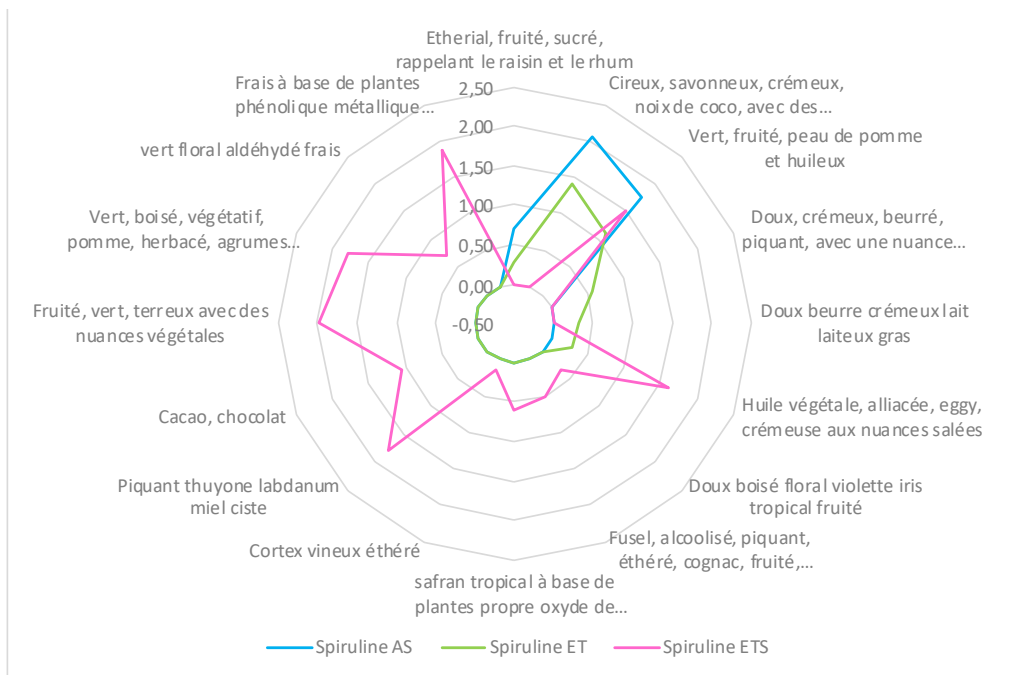


Figure 72 : Profil aromatique de la spiruline fraîche AstroFood (AS), de la spiruline fraîche ETIKA (ET) et de la spiruline séchée ETIKA (ETS) exprimée en log de l'OAV.

3.3.7. CONCLUSIONS

La dernière étude terminée, les données sur les biomasses, la cuisson ohmique et les caractéristiques des gaufres à base de spiruline ont pu être récoltées. Ces données serviront à déterminer le respect du cahier des charges.

La spiruline d'AstroFood semble la plus appropriée pour la réalisation du Space Dessert. La cuisson ohmique et la farine de riz semble également les meilleurs paramètres à sélectionner pour obtenir la composition la plus intéressante. L'échantillon Sf.R.OH.V2#Sas est retenu comme le produit final de cette dernière recherche.



Figure 73 : photos de la cuisson de la gaufre Sf.R.OH.V2#Sas

4. VALIDATION DU CAHIER DES CHARGES

Les trois études ont permis de mettre au point la formulation la plus adaptée aux attentes. Le produit final pour la validation de ce projet est l'échantillon Sf.R.OH.V2#Sas.

4.1. SÉCURITÉ

L'Aw du mélange de poudre est de **0,494±0,002**, entre 0,2 et 0,5. Le produit, de par sa conception ne présente pas de risques avérés. Aucun test ne permet de le prouver mais des tests de vieillissement viendront appuyer cette information. Le score de friabilité de cet échantillon est de **1**, ce qui représente la production d'aucune miette d'après le questionnaire de dégustation en Annexe III.

4.2. SOCIÉTÉ

La gaufre a été portionnée pour 1 personne et l'hydratation de la poudre se fait à l'aide de la biomasse fraîche. Le poids total de la poudre est de 39,4 g pour une portion de 80g de pâte crue → 72,51±0,95 g de gaufre. La poudre représente **54,3%** du poids total de la gaufre cuite et respecte le CDC. Le genre de la spiruline est bien *Limnospira*, les produits viennent des pays membres de l'ESA. L'emballage n'ayant pas été réalisé, il ne respecte pas le cahier des charges relatif à son étiquetage.

4.3. SERVICE

Une portion de gaufre est composée de **80g** de pâte, ce qui est inférieur à 150 g (limite maximale).

La DDM n'a pas été déterminée.

4.4. SANTÉ

Le Tableau 41 reprend les valeurs nutritionnelles du Space Dessert. La portion fait 115<**196**<200 Kcal mais seulement **6,83**<10 g de protéines. Celles apportées par la spiruline ne représentent que **37,45%** de l'apport total ; cela ne respecte pas le CDC. La spiruline d'Etika permet d'obtenir 11,58g de protéines pour 173 Kcal ; une biomasse plus concentrée d'AstroFood permettrait d'obtenir des résultats similaires.

La teneur en matière sèche de la biomasse ne respecte pas le CDC car elle est inférieure à **10%**, cependant la pâte à gaufre est composée d'au moins 50% de spiruline fraîche.

La liste des ingrédients autorisés a été respectée.

Tableau 41 : valeurs nutritionnelles de la gaufre Sf.R.OH.V2#Sas

Dénominations	Sf.R.OH.V2#Sas	
Valeurs pour	100 g	80 g
Calories (Kcal) P*L*G	211	196
Eau (g/100 g)	49,27	39,41
Protéines, N x 6.25 (g/100 g)	8,54	6,83
Glucides (g/100 g)	35,42	28,34
Lipides (g/100 g)	3,91	3,13
Sucres (g/100 g)	14,92	11,93
Amidon (g/100 g)	18,95	15,16
Fibres alimentaires (g/100 g)	1,51	1,21
Cendres (g/100 g)	1,31	1,04
Calcium (mg/100 g)	123,46	98,76
Fer (mg/100 g)	5,62	4,50
Magnésium (mg/100 g)	55,88	44,71
Potassium (mg/100 g)	272,1749	217,7399
Rétinol (µg/100 g)	13894,17	11115,33

4.5. SATISFATION

Le score total de dégustation est de **2**, il doit être inférieur à $2 \times 1,15 = 2,3$. Au niveau de la texture, la dureté la gaufre est de $35,9 > 23,23 < 43,8$ N ; la masticabilité est de $21,3 > 12,3 < 28,8$ N ; la fracture est de $33,6 > 22,8 < 45,4$ N. Les critères de texture ne sont pas respectés.

Les objectifs hédoniques n'ont pas encore été analysés et font partie des perspectives.

Le profil aromatique ne montre pas d'élément désagréable, mais l'analyse n'a pas été réalisée sur cet échantillon.

La masse humide de la pâte avec spiruline est de $43,9 < 49,3 < 53,7$ % et la perte de masse hydrique à la cuisson est de $9,36 \pm 1,19 < 15$ %.

La forme du moule est cylindrique, ce qui est une forme simple.

5. PERSPECTIVES

5.1. MASSE VOLUMIQUE

Après avoir appliqué la méthode de mesure des masses volumiques choisie, il a été constaté que celle-ci avait été mal appliquée, invalidant les mesures à cause d'une trop grande variabilité des mesures et un manque de précision.

Pour une mesure plus précise du volume des gaufres, il aurait fallu appliquer une technique alternative qui a déjà été utilisée pour mesurer le volume de différents types de pains sans gluten cuit au four ohmique (Michels et al., 2021). Cette approche a démontré son efficacité et pourrait être adaptée aux échantillons de cette étude.

Matériel :

- ⇒ 2 récipients de capacité égale, suffisamment grands pour contenir une gaufre.
- ⇒ Un matériau de remplissage, comme des grains de riz ou des perles de polystyrène.

- ⇒ Raclette.
- ⇒ Un agencement vertical comprenant les éléments suivants de haut en bas : un dispositif en forme d'entonnoir pour insérer le matériau de remplissage, une chambre de réception du matériau équipée d'un fond constitué d'un tamis, une plateforme destinée à supporter le récipient, un second entonnoir positionné sous le tamis pour recueillir tout excès de matériau, et enfin un pied muni d'une échelle graduée permettant de mesurer la quantité d'excès de manière précise.
- ⇒ Balance.

Méthode :

- ⇒ Pesée d'une gaufre sur la balance.
- ⇒ Placement de la gaufre dans l'un des récipients, posé sur la plateforme centrale de la structure.
- ⇒ Remplissage de l'autre récipient à ras bord avec le matériau de remplissage, suivi du retrait de l'excès avec la raclette.
- ⇒ Faire tomber le remplissage dans l'entonnoir supérieur de la structure, suivi de son laisser-remplissage de l'autre récipient contenant la gaufre jusqu'à ce qu'il déborde.
- ⇒ Le volume du matériau de remplissage qui déborde correspond au volume de la gaufre présente dans la structure, et il peut être lu au niveau du pied gradué.

Cette méthode permettrait d'obtenir des résultats plus précis et valides scientifiquement. À l'aide du volume, la masse spécifique a été calculée ; celle-ci met l'accent sur la compacité de deux échantillons. Toutefois, il aurait également été intéressant de réaliser l'équation inverse qui est le volume spécifique ; cette donnée indique l'espace que prend une substance par unité de masse.

5.2. TESTS DE VIEILLISSEMENT

Dans le contexte de ce projet, il est crucial de considérer l'importance du test de vieillissement qui a pour objectif d'évaluer la stabilité, la qualité et la sécurité du produit sur une période prolongée en au vu des conditions particulières de l'espace auxquelles les aliments seront exposés.

Dans la recherche scientifique, certains experts utilisent souvent le test de vieillissement accéléré. Dans l'industrie agro-alimentaire, cela consiste à soumettre un aliment à des conditions spéciales pour simuler des effets qui se produiraient normalement beaucoup plus tard. Il existe deux méthodes de vieillissement accéléré, choisies en fonction du produit et des résultats recherchés. La première méthode expose les échantillons à des températures élevées, généralement entre 27 °C et 40 °C. Cependant, cela peut parfois provoquer des réactions qui ne se produiraient pas à des températures plus basses. La deuxième méthode, qui consiste à réduire l'oxygène, est considérée comme plus fiable et efficace malgré les précautions de sécurité complexes à mettre en place³⁶.

Bien que le test de vieillissement n'ait pas été effectué dans ce projet, il est souhaitable d'établir certaines hypothèses basées sur la nature du produit qui a été développé. Le produit se présente sous la forme d'un mélange de poudre. Cette caractéristique présente des avantages en termes de stabilité, car la teneur en eau est réduite. L'activité de l'eau faible, devrait contribuer à sa préservation sur une période prolongée. De plus, l'utilisation d'un emballage sous vide soigneusement conçu ajoute une couche de protection supplémentaire. Cette étanchéité aide à préserver les qualités sensorielles et

³⁶ Vieillissement Accéléré – explications du vieillissement accéléré | N.D. Celabor. Consulté le 16 août 2023, https://www.celabor.be/site/5_vieillissement-accelere/index.html

nutritionnelles du mélange de poudres en empêchant l'oxygène, l'humidité et d'autres facteurs environnementaux d'interagir avec le produit. Toutefois, il est important de souligner que ces hypothèses sont basées sur des considérations théoriques et doivent être validées par des tests pratiques et scientifiques.

Pour confirmer ces hypothèses, il serait possible d'utiliser les paramètres du test de vieillissement accéléré des travaux de D'Hondt et al. (2022) en réalisant un test de vieillissement accéléré dans une chambre thermostatique du mélange de poudre emballé sous-vide. La durée du test serait de 28 semaines à la température de 32°C. Les mesures de l'activité de l'eau seraient relevés tous les 7 jours afin de vérifier la stabilité du produit.

5.3. DÉGUSTATION PAR UN PANEL

Afin de valider le cahier des charges, la gaufre doit répondre aux questions « Est-ce que la gaufre à base de spiruline fraîche est différente d'une gaufre équivalente réhydratée à l'eau ? » et « Est-ce que la gaufre à base de spiruline fraîche est appréciée ? ». Pour y arriver, des tests hédoniques et discriminatifs devraient être réalisés.

5.3.1. RÉALISATION D'UN TEST HÉDONIQUE

Étant donné l'impossibilité de regrouper un panel représentatif de la cible, c'est-à-dire les astronautes, il faut se retrancher sur un panel représentatif de la population générale ayant un master scientifique, car il s'agit d'une des conditions pour postuler en tant qu'astronaute. L'idée serait de recruter un panel entre 25 et 75 personnes en vue de récolter des premiers résultats et trouver des perspectives d'améliorations avant de réaliser un test consommateurs sur plus de 100 personnes.

L'idée serait de réaliser une évaluation sur l'apparence, la texture, la saveur, l'impression générale ainsi que l'acceptabilité générale du produit. Une fiche de dégustation expérimentale est proposée en Annexe III ; celle-ci doit être révisée et adaptée pour avoir une meilleure compréhension des critères par le panel.

Le nombre d'échantillon proposé serait de 12 : Com, Cf.R.G, Cf.R.MW.9, Cs.R.G#SMG, Cs.R.MW#SMG, Sf.R.G#Set, Sf.R.G#Sas, Sf.R.MW#Set, Sf.R.MW#Sas, Sf.R.OH.V2#Sas, Sf.R.OH.V2#Set et Cs.R.OH.V2#SMG.

Les échantillons seraient présentés avec un code à 3 chiffres aléatoire et randomisé avec de quoi se rincer la bouche car certains échantillons ont un goût plus prononcé. Le test doit être réalisé à l'aveugle.

Une fois réalisés, les résultats pourront être encodés et comparés de manière similaire aux dégustations internes au point 2.6.4 à la page 73.

5.3.2. RÉALISATION D'UN TEST DISCRIMINATIF

L'objectif du test discriminatif serait de vérifier l'existence ou l'absence de différences gustatives entre deux produits, dans ce cas il s'agirait des échantillons Cs.R.G#SMG vs Sf.R.G#Sas, Cs.R.MW#SMG vs Sf.R.MW#Sas et Cs.R.OH.V2#SMG vs Sf.R.OH.V2#Sas.

Le test devrait être réalisés à l'aveugle, dans des conditions où la couleur et la forme du produit ne puissent pas être distingués entre les deux échantillons afin de ne pas influencer le résultat. Cela peut

être réalisé par l'ajout de colorant neutre en goût dans la version classique ou en réalisant le test dans une pièce sombre.

Les sujets devraient être naïf, représentatif de la population générale ayant un master scientifique. Un test triangulaire (norme iso 4120) pourrait être réalisé sur au moins 20 personnes. Ce test pourrait être réalisé en amont, par les mêmes participants que le test hédonique.

5.4. PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION DE LA CUISSON OHMIQUE

Les analyses complémentaires des biomasses sur la cinétique de température et de conductivité au four ohmique n'ont pas été présentés dans les résultats car une erreur de manipulation a rendu les résultats inexploitable. Par manque de temps, ces mesures n'ont pas pu être réitérées. Il serait cependant intéressant de réaliser à nouveau ces tests sur les spirulines ainsi que sur les œufs pour pouvoir comparer les cinétiques sur un produit de référence. Cela permettra une meilleure compréhension de la cuisson des microalgues au four ohmique.

Une autre étude intéressante serait de mesurer la conductivité du sucre blanc et du sucre brun, car selon Thomason et al., (2019), les minéraux contenus dans le sucre brun entraînerait une augmentation de la conductivité lors de la cuisson. Il serait intéressant de comparer les résultats des deux sucres dans l'eau ainsi que dans un produit alimentaire, tel que les gaufres, à différentes concentrations.

6. CONCLUSIONS

Le développement pratique du Space Dessert ne fut pas une mince affaire au vu des connaissances très restreintes sur la spiruline fraîche.

Les résultats ont permis de déterminer que la farine de riz était la plus adaptée pour le développement du Space Dessert. Cependant, au vu du temps disponible pour réaliser les essais au four ohmique, aucun test avec la farine de blé n'a été effectué. Des choix ont dû être faits pour avancer dans les recherches. Cependant, il serait très intéressant de réaliser des tests avec cet aliment car il contient du gluten, qui pourrait se comporter différemment au four ohmique comparé au four à micro-ondes.

Plusieurs avantages de la cuisson ohmique sur l'aliment ont pu être démontrés, tels que le volume du produit, les propriétés de texture intéressantes, ainsi que la pertinence de ce mode de cuisson pour le voyage spatial dans le respect des critères ALISSE.

Le projet a également permis de mettre en évidence les différences entre les types de cultures de microalgues et leur impact sur les gaufres. La culture en bioréacteur contrôlé permet d'obtenir une spiruline de meilleure qualité, mais il est évident que les coûts de production sont bien plus élevés même si cela n'est pas le cœur du sujet. La gaufre à base de spiruline se rapproche fort du goût de la même gaufre sans spiruline grâce aux microalgues d'AstroFood.

L'objectif principal de cette étude était de déterminer la faisabilité du projet. Malgré les problèmes rencontrés et le manque de certaines données, il est à présent clair que le projet est réalisable. Il possède un grand potentiel mais est loin d'être terminé. Beaucoup de points sont à améliorer dans le prototypage. Cette étude au complet a permis de définir une première formulation fonctionnelle avec l'échantillon Sf.R.OH.V2#Sas. Cependant, beaucoup de points du cahier des charges ne sont pas respectés. L'amélioration de la formulation doit permettre de respecter tous les critères fixés au préalable.

La chaîne de production doit également être approfondie, réfléchie et validée. Cependant, cela nécessite une équipe plus grande et des compétences variées, ces dernières ne pouvant être regroupées pour le travail.

VII. LES EMBALLAGES

Le présent chapitre est consacré à l'étude des emballages, le cahier des charges fonctionnel est abordé pour le mélange sec et pour la conservation du Space Dessert dans l'ISS suivies de quelques remarques pour affiner le travail. Ensuite les matériaux utilisés dans le secteur ainsi que des alternatives écoconçues sont proposés.

1. LES MATÉRIAUX D'EMBALLAGES UTILISÉS DANS LE SECTEUR

Les matériaux d'emballages ont évolué au cours du temps et des missions spatiales. Aujourd'hui ses missions spatiales ont un problème de qualité et de volume dû à l'utilisation de deux emballages différents pour combiner plusieurs produits. Des recherches sont effectuées pour optimiser l'utilisation des emballages. L'emballage des missions spatiales à venir doit être fabriqué à partir de matériaux non toxiques qui ne migrent pas dans les aliments, sans réactions chimiques qui causent une perte de nutriments. L'emballage doit être pratique pour le transport, léger, durable, capable de résister à la force physique qui peut altérer la forme des aliments, sans générer de volume inutile et produisant moins de déchets (Jiang et al., 2020).

Différents types de matériaux sont actuellement utilisés pour emballer les produits dans l'espace. Sont utilisés : des poches sous vide et étanche à l'air en aluminium et polyéthylène, des conserves en métal, sac autoclave, emballages en polyéthylène téréphtalate, cartons, papier, papier kraft, papier laminé, tube en aluminium, ... (Pandith et al., 2022).

Cependant tous ne concernent pas les emballages utilisés pour les aliments déshydraté / lyophilisé. Deux emballages peuvent être adaptés au mélange sec : le sac autoclave et l'emballage dit « haute barrière ».

1.1. LE SAC AUTOCLAVE

Le sachet autoclave est un type d'emballage conçu pour contenir des aliments qui ont été stérilisés par autoclave. Il est fabriqué à partir de matériaux tels que le plastique souple et les feuilles de métal, qui sont résistants à la chaleur et à la pression élevée de l'autoclave. Les sachets autoclaves peuvent être utilisés pour emballer une grande variété d'aliments. Ils sont utilisés dans diverses applications, dont les aliments pour le spatial³⁷. Cet emballage possède plusieurs avantages tels qu'une conservation stable, un gain de poids, la diminution de l'espace utilisé, la facilité à ouvrir et utiliser, le maintien de la qualité du produit emballé (Chia et al., 1983)

Le sac autoclave est composé de plusieurs couches : polyester, aluminium, nylon et polypropylène³⁷³⁸³⁹. Les différentes couches sont détaillées dans le Tableau 42.

³⁷ Sachet autoclave – Article d'encyclopédie en ligne | 22/08/2022. Wikipedia. Consulté le 15 janvier 2023, https://fr.wikipedia.org/wiki/Sachet_autoclave

³⁸ What is a retort pouch – Questions-réponses de l'USDA | 10/11/2022. U.S. Department of Agriculture. Consulté le 15 janvier 2023, <https://ask.usda.gov/s/article/What-is-a-retort-pouch#:~:text=A%20retort%20pouch%20is%20commonly,%2C%20aluminum%20foil%2C%20and%20polypropylene.>

³⁹ Layers In A Retort Pouches For Ready-To-Serve Products – Explication d'une poche autoclave | Expert en packaging. Date. LOGOS. Consulté le 15 janvier 2023, <https://www.logospack.com.hk/layers-in-a-retort-pouches-for-ready-to-serve-products/>

Tableau 42 : Description des différentes couches d'un sac autoclave (Kropf et al., 2014; Martinez-Ceniceros et al., 2022)

Couche	Epaisseur	Caractéristiques
Polyester (PES)	12 µm	Couche externe très rigide avec une impression facile.
Aluminium (Al)	12 µm	Protège de la lumière, des gaz, des odeurs.
Nylon	15 µm	Résistance aux perforations et à l'abrasion.
Polypropylène (PP)	75 µm	Couche interne permettant le scellage. Il est également rigide et flexible.

La conservation par autoclave permet de garder l'intégrité des composés, de la qualité nutritionnelle et organoleptique de l'aliment emballé (Martinez-Ceniceros et al., 2022).

Ce sac multicouche ne permet pas la séparation des différentes parties, ce qui rend le recyclage complexe.

1.2. EMBALLAGE DIT « À HAUTE BARRIÈRE »

Un matériau d'emballage alimentaire ayant des propriétés de barrière élevée à l'oxygène et à l'humidité a été développé pendant la mission Gemini en 1965 (Perchonok et al., 2002). Ces propriétés de barrière élevée ont permis d'éviter la détérioration des aliments.

Parmi ces matériaux, le copolymère éthylène-alcool vinylique (EVOH) est le plus utilisé dans la fabrication des emballages pour ses bonnes performances de barrière permettant une meilleure protection et une bonne conservation des produits et surtout en tant que barrière à l'oxygène (Selwitz et al., 1999). Il permet de préserver la qualité nutritionnelle de l'aliment et de prolonger leur durée de vie.

Pour bénéficier pleinement de cet effet barrière, il est nécessaire d'associer l'EVOH à un autre matériau présentant des propriétés barrières à l'humidité afin de garantir la stabilité du contenu de l'emballage dans un environnement à haute température et à forte humidité. À cette fin, il est généralement associé à des Polypropylène (PP) et des Polyéthylène (PE), dans des emballages multicouches, souples et flexibles.

Aujourd'hui dans l'ISS, les déchets des emballages sont stockés dans de grands sacs ou des conteneurs avant d'être embarqués dans les vaisseaux cargos qui rentrent vers la Terre. Dans ce cas, soit ils sont traités sur cette planète, soit ils sont brûlés lors de la rentrée dans l'atmosphère terrestre. Par ailleurs, les matériaux flexibles à haute barrière (EVOH, PP et PE) sont facilement recyclables, de plus, ils ont un impact environnemental plus faible par rapport aux autres formats d'emballage en raison de leurs poids léger.

1.3. MATÉRIAUX D'EMBALLAGES ALTERNATIFS ET ÉCO-CONÇUS

Une première alternative est l'emballage autoclave conçu par AMCOR. L'emballage est résistant, protège des gaz externes, prolonge la durée de vie du produit, protège de l'humidité et des micro-organismes externes, le tout en étant résistant. Il est jusqu'à 21% plus léger que l'emballage classique autoclave, son empreinte carbone est diminuée de 11%, la soudure 40% plus résistante, le tout en étant recyclable⁴⁰. Il reste cependant à savoir si cet emballage résiste à l'utilisation et est adaptable pour ajouter un embout pour l'ajout de liquides car les matériaux utilisés ne sont pas connus.

⁴⁰ Infographic: Unlock your brand's potential with recyclable retort packaging – article sur la poche autoclave d'AMCOR | 24/06/2022. AMCOR. Consulté le 15 janvier 2023, <https://www.amcor.com/insights/educational-resources/recycle-ready-retort-packaging>

2. CAHIER DES CHARGES FONCTIONNEL DU PACKAGING

Le Tableau 43 reprend le cahier des charges fonctionnel pour la poudre à mélanger.

Tableau 43 : Cahier des charges fonctionnel de l'emballage de la poudre à mélanger (Léonard, 2021)

Ensemble des fonctions techniques et marketing					
Protection	Assurer la protection du produit				
	Mécanique	Résister aux contraintes de gerbage et de transport			
	(stomacher)	Chocs	Résister aux chutes, chocs et vibrations		1
		Compression	Contribuer, par sa résistance mécanique, à la résistance au gerbage		1
	Gaz	Protéger le produit de l'oxydation, de l'humidité, et de tous gaz nuisibles			1
	Arômes	Protéger le produit de la prise, ou de la perte, d'arômes			1
	DLC	Assurer une protection, avant ouverture, permettant d'atteindre la DLC sans perte organoleptique			1
Logistique	Être compatible avec les contraintes logistiques				
	Vol	Optimisation de la place efficace			
		Espace	Optimiser la quantité de produits par vol		1
		Stabilité	Permettre une bonne stabilité des charges		5
	Contrôle	Faciliter le contrôle à réception des produits			2
	Stockage	Faciliter le stockage dans la station			
	Emballage secondaire	Stockage	Optimisation de la place utilisée		1
		Ouverture	Constituer une unité de distribution ouvrable facilement sans instrument		1
		Fermeture	L'unité de stockage doit être refermable et réutilisable		1
	Manutention	Faciliter les opérations de manutention			1
Conditionnement	Faciliter les opérations de mise en forme et de remplissage de l'emballage				
	Standardisation	Faciliter les changements de format (format fixe)			5
	Ergonomie	Possède un système anti-reflux permettant d'incorporer la biomasse dans l'emballage sans risque de rejet.			1
		Ne présenter aucun risque pour le personnel			3
	Volume à vide	Occuper un minimum de volume avant mise en forme et remplissage, tout en gardant de la place pour l'ajout de la biomasse			3
	Approvisionnement	Être disponible chez plusieurs fournisseurs			5
	Hygiène	Les critères d'hygiène sont stricts			1
	Technique	L'emballage permet de cuire l'aliment directement dedans			3
Astronautes	Ensemble des fonctions facilitant l'usage pour l'astronaute				
	Préhension	Avoir une bonne prise en main			3
	Rangement	Être facile à ranger dans les lieux de stockage usuels			1

Ensemble des fonctions techniques et marketing

	Ouverture/fermeture	Faciliter l'ouverture et la fermeture							
		Ouverture facile	Faciliter l'ouverture de l'emballage		2				
		Inviolabilité	Présenter une trace évidente en cas d'ouverture intempestive	1					
		Refermeture	Faciliter la refermeture de l'emballage						5
	Facilité d'emploi	Permettre une utilisation aisée du produit dans l'ISS.		1					
	Réutilisation	Permettre une éventuelle réutilisation de l'emballage pour un autre usage que celui prévu initialement (recyclage).							5
Ecologie	limiter les nuisances à l'environnement								
	Écobilan	Présenter un bilan de cycle de vie favorable (dans la mesure du possible)							
		Air	Minimiser les volumes d'air pollué	1					
		Eau	Minimiser les volumes d'eau polluée	1					
		Déchets	Minimiser les volumes de déchet solide après élimination	1					
		Énergies	Minimiser les quantités d'énergie nécessaires > fabrication de l'emballage	1					
			Minimiser les quantités d'énergie nécessaires > conditionnement	1					
		Matières premières	Minimiser les poids de matières premières nécessaires à la fabrication de l'emballage	1					
	Éco-conception	Intégrer les critères environnementaux dans la conception de l'emballage, limiter les impacts, cradle 2 cradle							
		Vérifier les règles des 10 R							
		1. Réflexion	Réfléchir dès la conception aux impacts environnementaux	1					
		2. Retrait	Retirer l'inutile	1					
		3. Réduction	Réduire ce qui n'est pas nécessaire	1					
		4. Réutilisation	Réutiliser les emballages ménagers et industriels, Être re-remplissable (consigné)						5
		5. Recyclabilité	Faciliter le tri sélectif et le recyclage matière			3			
		6. Récupération	Récupérer l'énergie potentielle et valoriser la fin de vie (système MELISSA)			3			
		7. Remplacement	Remplacer les matériaux et/ou les énergies	1					
		8. Re-conception	Reconcevoir le packaging pour optimiser l'utilisation	1					
		9. Relativité	Relativiser les impacts directs sur l'ACV après le changement			3			
		Volume poubelle	Minimiser la place du déchet dans la poubelle	1					

Remarques :

- L'essentiel du packaging est focalisé sur la sécurité et la conservation. Le produit doit être en sécurité, il ne peut pas être déchirable à main nue au risque de contaminer l'environnement. L'emballage ne doit être ouvrable qu'à l'aide d'une paire de ciseaux.

- Il doit être assez résistant pour pouvoir passer dans un système mélangeur tel qu'un stomacher.
- L'emballage doit être assez grand pour permettre l'ajout des microalgues et rester compressible au malaxage. Il doit également prévoir le système d'ajout de biomasse avec un mécanisme anti-reflux.
- L'étiquetage se limite au nom du produit, code-bar et DDM.
- Une fois utilisé, l'emballage est destiné à être jeté.
- Les emballages ne sont actuellement pas biodégradables mais l'idée d'avoir un emballage biosourcé et dégradable dans le compartiment CI du système MELISSA doit être envisagé.
- Les déchets coûtent extrêmement cher, ils doivent donc être minimisés.
- L'application de velcro doit être possible car il s'agit du système de fixation le plus utilisé pour les aliments au sein de l'ISS.

3. PROPOSITION D'EMBALLAGE

3.1. EMBALLAGE SOUS-VIDE POUR LA CUISSON OHMIQUE

Le chauffage ohmique se présente comme une solution de chauffage prometteuse pour être exploitée dans le contexte des missions spatiales. Cela s'explique par les exigences spécifiques auxquelles les dispositifs de transformation alimentaire doivent répondre lorsqu'ils opèrent dans un environnement spatial. Parmi ces exigences figurent des paramètres tels que le volume de stockage, la capacité énergétique de l'équipement et l'utilisation de ressources en eau. À l'heure actuelle, les navettes spatiales sont équipées de fours à convection pour chauffer les aliments, mais compte tenu des projets de voyages spatiaux de longue durée prévus à l'avenir, une réévaluation des systèmes de cuisson s'impose.

Le produit a fourni des résultats satisfaisants à la cuisson ohmique. L'idéal pour faciliter la manipulation serait d'avoir un emballage thermorésistant avec les électrodes incorporé dans celui-ci. Cette technologie permettrait de retirer une étape de manutention des produits (voir Figure 17 : Concept de la production d'une gaufre cuite au four ohmique en milieu spatial.).

C'est ce qu'a développé Jun et al. (2005) dans leur étude sur la modélisation et l'optimisation de la cuisson ohmique d'un aliment d'un emballage flexible. Cet article se focalise sur l'élaboration d'une enveloppe flexible renfermant des électrodes sous forme de feuilles, destinées à réaliser un chauffage homogène des aliments contenus dans cette enveloppe. Les électrodes adoptent la structure en aluminium et s'étendent au-delà de la surface de l'enveloppe, comme illustré dans la Figure 74.

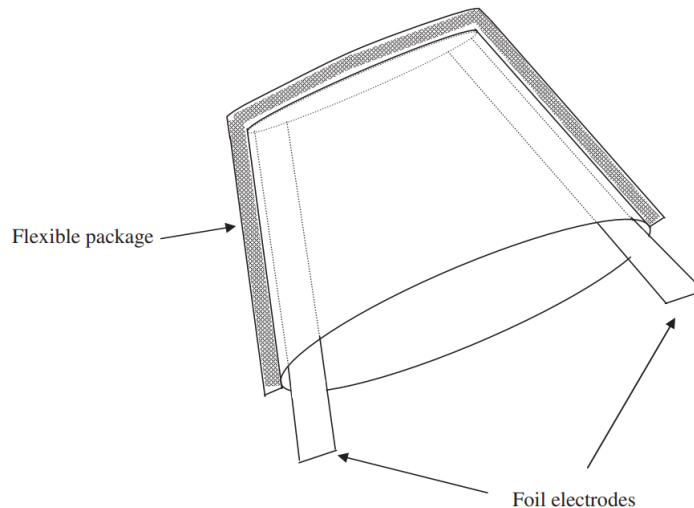


Figure 74 : Schéma d'un packaging flexible avec des électrodes flexibles (Jun et al., 2005).

Le dispositif a été conçu en utilisant des laminés multicouches. Ce procédé consiste en la superposition de plusieurs couches : une fine pellicule d'aluminium couverte par un film de protection polymère (composé de polyester et de nylon) sur la face externe du dispositif, et un film polymère thermoscellable (polyéthylène) formant la couche intérieure. Les électrodes, composées de feuilles d'aluminium d'une épaisseur de 2 mm, sont disposées entre les plis d'un laminé plié. Ces électrodes dépassent du dispositif et sont scellées par thermoscellage sur les bords. Un boîtier fabriqué à partir d'un polymère amorphe a été spécialement conçu pour permettre au dispositif flexible d'entrer en contact avec le circuit électrique externe.

Trois configurations d'électrodes ont été testées dans leur étude (Figure 75). La poche A (électrodes parallèles) montre une distribution de la force électrique plus uniforme que les deux autres. Il est très important de considérer la distance entre les électrodes afin de prévenir tout excès de la force électrique, également connu sous le terme de « overshoot ».

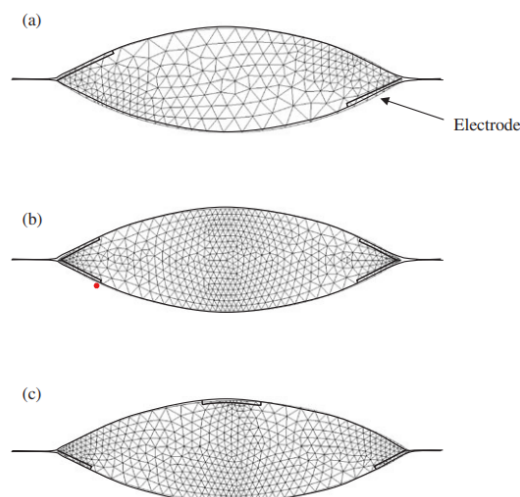


Figure 75 : différentes configurations des électrodes dans l'emballage flexible (Jun et al., 2005)

Au vu des résultats des travaux de Jun et al. (2005) et des recherches, un emballage similaire aux dimensions du produit pour 1 personne est proposé. L'emballage devrait contenir 21,65 g de farine de

riz, 10,83 g de sucre brun, 0,14 g de levure chimique, 3,47 g de poudre de lait entier, 3,32 g d'œuf entier en poudre et doit pouvoir accueillir 45,81g de spiruline fraîche.

Sur base du matériel, une poche sous-vide de 19,6 cm sur 14,8 cm a été utilisée, ce qui représente une superficie de 290,08 cm². Cependant la poche était prévue pour 280 g de pâte, pour une portion de 80 g, il serait intéressant de diminuer la superficie de l'emballage de moitié. Des tests de résistance, et de mélange devraient être réalisés pour déterminer la configuration et la taille optimale. Toutefois, avec les résultats obtenus, il est d'ores et déjà possible de proposer un prototype d'emballage qui ferait une superficie de 145,04 cm² (19,6 cm sur 7,4 cm), en diminuant la largeur de moitié afin de rapprocher les électrodes (Figure 76). Car comme indiqué dans différentes études, la cuisson est dépendant de la distance entre les électrodes. La puissance de cuisson se calcul en V/m, cette configuration permettra de diminuer le voltage, et ainsi économiser de l'énergie. Ce qui est en adéquation avec les critères ALISSE. Ceci est une proposition d'emballage, une étude rigoureuse est nécessaire pour prouver la faisabilité de ce concept.

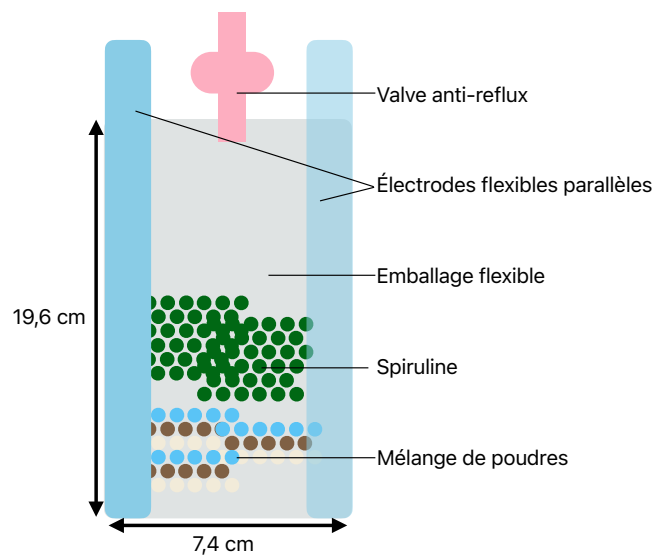


Figure 76 : Proposition d'emballage pour la cuisson d'une portion de gaufre à base de spiruline fraîche.

La poche doit également être équipée d'une valve anti-reflux pour ajouter la spiruline ainsi que de l'air pour retrouver une pression ambiante sans libération de matière possible. Un système existant pourrait être ajouté à l'emballage lors du scellage de la poche. Une valve anti-retour en polyéthylène haute densité avec une bonne résistance chimique et thermique fixable sur des tuyaux de 6-9 mm de chez Brand pourrait être une piste de départ⁴¹.

3.2. ALTERNATIVE D'EMBALLAGE RECYCLABLE

Le développement d'un matériau d'emballage biodégradable, résistant aux températures élevées compatible avec la cuisson ohmique, résistant à toutes les contraintes du cahier des charges et adapté à l'environnement spatial est un défi complexe, mais des idées innovantes pourraient être considérées :

⁴¹ Valve anti-reflux – Matériel médical | N.D. Avantor delivered by VWR. Consulté le 16 août 2023, <https://be.vwr.com/store/product/fr/578218/valve-anti-retour>

Des Bio-Composite associant plusieurs matériaux biodégradables pourraient être envisagés pour répondre aux critères du CDCF. Une piste pourraient être les films comestibles à base d'hydroxypropylméthylcellulose (HPMC) contenant du glycérol étudié par Al Mahdi (2006) durant sa thèse. Il reste cependant à voir si le développement d'un tel prototype est compatible avec les exigences du travail, mais il aurait l'avantage de rejoindre le cycle de recyclage des composés organiques du système MELiSSA et ainsi récupérer les déchets comme source d'alimentation pour le développement du compartiment CIV.

VIII. CONCLUSIONS

1. FAIBLESSES

Plusieurs faiblesses sont à répertorier dans ce projet. Tout d'abord la cuisson au gaufrier. En effet, l'appareil ne permettait pas une cuisson régulière au vu de la variabilité des résultats. Il s'agit également d'un mode de cuisson peu utilisé dans les études scientifiques, ce qui complique la comparaison des résultats avec la littérature. Une alternative aurait été de partir sur un cake individuel cuit au four. Cela aurait été plus en accord et plus facile à comparer au vu des études sur le sujet. Les moules des gaufres au four à micro-ondes et au four ohmique offrent des formes qui sont plus adaptées au cake individuel. Ceci dit, il s'agit d'une piste aussi intéressante à développer, dont les résultats pourront être comparés avec les données de ce travail.

Une seconde faiblesse de ce travail était le manque d'uniformité des échantillons. En effet, la grande disparité entre les formes des gaufres des différentes cuissons ne permet pas une analyse totalement objective, ce qui peut poser des problèmes lors de l'interprétation des résultats. Comme cela a été dit dans le paragraphe précédent, le cake pourrait être une alternative pour comparer plus objectivement les données des différentes cuissons.

Les inexactitudes dans le protocole de mesure des masses volumiques ont rendu une portion des données inutilisables pour comparer les résultats obtenus avec des recherches similaires ultérieures.

Un manque de rigueur et de réflexions à certaines étapes du projet a pu entraîner certaines variabilités des résultats, qui ne devraient pas avoir lieu dans une étude scientifique rigoureuse.

Lors de l'analyse du profil aromatique des échantillons, le blanc n'a pas été réalisé, ce qui rend une partie des résultats obtenus incertaine. Ceci-dit, ces résultats pourront toujours être comparés avec d'autres études du profil aromatiques des microalgues fraîches.

2. CONCLUSION GÉNÉRALE

Le projet a commencé par la volonté de concevoir un dessert avec une partie d'aliments frais pour répondre à un manque dans le domaine spatial. En effet, la station est un endroit confiné qui met à rude épreuve le mental des astronautes. C'est la raison pour laquelle ce projet s'est articulé autour d'un dessert. Cependant, certains critères doivent être respectés pour concevoir une telle recette dans l'espace : celle-ci doit être en adéquation avec le matériel disponible, les contraintes de l'absence de gravité, les besoins particuliers en nutriments des astronautes, elle doit pouvoir s'intégrer dans le projet du consortium MELISSA et des critères ALISSE, tout en respectant un équilibre entre l'apport de matières premières depuis la Terre et la production de la biomasse sur place.

L'objectif fixé était donc de réaliser un dessert respectant toutes les contraintes énumérées ci-dessus en incorporant la biomasse produite sur place.

Le travail bibliographique a permis de mettre en avant ce qui est actuellement fait en terme d'alimentation pour l'espace et les perspectives d'avenir ; les besoins élevés en protéines de l'astronaute et les micro-nutriments essentiels pour limiter les impacts sur la santé des longs voyages sans gravité, et les informations de la littérature scientifique sur les microalgues et leur production au sein du système MELISSA. Ces données ont permis de choisir le type d'aliment à réaliser : la gaufre.

L'étude des types de cuissons a permis de mettre en avant la cuisson au micro-ondes et au four ohmique, toutes deux réalisables en conditions spatiales. Celles-ci ont été comparées à la cuisson

classique au gaufrier. Comme la gaufre a été choisie pour la réalisation du dessert, un chapitre consacré sur ce sujet a permis d'établir ce qu'était une gaufre et les ingrédients qui la composent. Dans ce travail, les gaufres ont été caractérisées par la pâte plutôt que par la forme.

L'analyse de la finançabilité a permis de faire un état des lieux du marché alimentaire spatial plutôt chargé grâce à la diversité culturelle des astronautes. Pour approfondir le sujet, la mise en place de ces étapes pourra servir à le financer.

La deuxième partie du projet s'articulait autour de la réalisation du Space Dessert. Les résultats ont permis de montrer que la cuisson ohmique offre des résultats très intéressants pour les perspectives culinaires en milieu spatial car elle est rapide, économique et fiable. Cependant, un approfondissement de la matière est nécessaire pour mieux cerner tous les paramètres de cuisson et optimiser le processus. Les résultats ont également montré des meilleures caractéristiques pour la farine de riz au niveau du volume, de la dégustation et de la texture.

L'analyse des biomasses montre une nette différence entre le type de culture. La spiruline cultivée en photobioréacteur contrôlé est nettement de meilleure qualité avec un goût plus neutre que la spiruline cultivée en Race Way Ponds, ce qui rend l'incorporation de biomasse fraîche dans la gaufre réalisable.

En conclusion, les données récoltées ont permis de réaliser une première formulation de gaufre fonctionnelle à base de spiruline fraîche et de farine de riz cuite au four ohmique, même si beaucoup de points du cahier des charges ne sont pas respectés. Cette recette peut servir de base pour approfondir le sujet en optimisant la formulation ainsi que la chaîne de production dans l'espace qu'il reste à valider.

La réalisation de ce projet permet de prouver la faisabilité du concept. Il reste toutefois de nombreuses améliorations à faire pour mettre en place le fruit de ce travail dans l'espace.

CONCLUSIONS PERSONNELLES

Malgré certaines lacunes de ce travail, il a permis d'améliorer les connaissances sur le sujet.

L'apprentissage est un processus continu de remise en question. L'important est de se rendre compte de ses erreurs, les analyser et en tirer des conclusions afin de ne pas les reproduire et améliorer les futurs projets et travaux de notre vie.

IX. RÉFÉRENCES

1. BIBLIOGRAPHIE

- Abeyrathne E.D.N.S., Lee H.Y. & Ahn D.U., 2013. Egg white proteins and their potential use in food processing or as nutraceutical and pharmaceutical agents--a review. *Poult. Sci.* **92**(12), 3292–3299, DOI:10.3382/ps.2013-03391.
- Adarme-Vega T.C., Lim D.K.Y., Timmins M., Vernen F., Li Y. & Schenk P.M., 2012. Microalgal biofactories: a promising approach towards sustainable omega-3 fatty acid production. *Microb. Cell Factories* **11**(1), 96, DOI:10.1186/1475-2859-11-96.
- AFSCA, 2019. Partie 2 : Limites d'action pour les contaminants microbiologiques dans les denrées alimentaires.
- Ahmed J. & Ramaswamy H., 2007. Microwave pasteurization and sterilization of foods. *In: Handbook of Food Preservation.*
- Ahmed M. & Islam M., 2018. Moisture Sorption Characteristics of Selected Commercial Flours (Wheat, Rice and Corn) of Bangladesh 274–279, DOI:10.12691/ajfst-6-6-7.
- Al K.F., Chmiel J.A., Stuienberg G.A., Reid G. & Burton J.P., 2022. Long-Duration Space Travel Support Must Consider Wider Influences to Conserve Microbiota Composition and Function. *Life* **12**(8), 1163, DOI:10.3390/life12081163.
- Alemany L., Peiro E., Arnau C., Garcia D., Poughon L., Cornet J.-F., Dussap C.-G., Gerbi O., Lamaze B., Lasseur C. & Godia F., 2019. Continuous controlled long-term operation and modeling of a closed loop connecting an air-lift photobioreactor and an animal compartment for the development of a life support system. *Biochem. Eng. J.* **151**, 107323, DOI:10.1016/j.bej.2019.107323.
- Alfrey C.P., Rice L., Udden M.M. & Driscoll T.B., 1997. Neocytolysis: physiological down-regulator of red-cell mass. *Lancet Lond. Engl.* **349**(9062), 1389–1390, DOI:10.1016/S0140-6736(96)09208-2.
- Alfrey C.P., Udden M.M., Leach-Huntoon C., Driscoll T. & Pickett M.H., 1996. Control of red blood cell mass in spaceflight. *J. Appl. Physiol. Bethesda Md 1985* **81**(1), 98–104, DOI:10.1152/jappl.1996.81.1.98.
- Al-Muhtaseb A.H., Hararah M.A., Megahey E.K., McMinn W.A.M. & Magee T.R.A., 2010. Moisture adsorption isotherms of microwave-baked Madeira cake. *LWT - Food Sci. Technol.* **43**(7), 1042–1049, DOI:10.1016/j.lwt.2010.01.003.
- Amatore C., Berthou M. & Hébert S., 1998. Fundamental principles of electrochemical ohmic heating of solutions. *J. Electroanal. Chem.* **457**(1), 191–203, DOI:10.1016/S0022-0728(98)00306-4.
- Anderson J., Klemmer P., Watts M., Garner S. & Calvo M., 2006. Phosphorus. *In: Present Knowledge in Nutrition.* Washington D.C.: ILSI Press, 383–482.
- Anses, 2011a. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Virus de l'hépatite A.
- Anses, 2011b. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Norovirus.
- Anses, 2012. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : *Aspergillus flavus*.
- Anses, 2017. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : *Clostridium*

perfringens.

Anses, 2019. Escherichia coli entérohémorragiques (EHEC).

Anses, 2020a. AVIS révisé de l'Anses relatif à la filière de production des préparations en poudre pour nourrissons (Avis No. 2018-SA-0264), Anses.

Anses, 2020b. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Listeria monocytogenes.

Anses, 2020c. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Campylobacter jejuni, Campylobacter coli.

Anses, 2021a. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Salmonella spp.

Anses, 2021b. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Bacillus cereus.

Anses, 2022a. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Staphylococcus aureus et entérotoxines staphylococciques.

Anses, 2022b. Fiche de description de danger biologique transmissible par les aliments : Penicillium expansum et autres espèces productrices de patuline.

Anvar A.A., Nowruzi B., & Department of Biology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran., 2021. Bioactive Properties of Spirulina: A Review. *Microb. Bioact.* **4**(1), 134–142, DOI:10.25163/microbbioacts.412117B0719110521.

Arnaud S.B., Wolinsky I., Fung P. & Vernikos J., 2000. Dietary salt and urinary calcium excretion in a human bed rest spaceflight model. *Aviat. Space Environ. Med.* **71**(11), 1115–1119.

Aronne G., Muthert L.W.F., Izzo L.G., Romano L.E., Iovane M., Capozzi F., Manzano A., Ciska M., Herranz R., Medina F.J., Kiss J.Z. & van Loon J.J.W.A., 2022. A novel device to study altered gravity and light interactions in seedling tropisms. *Life Sci. Space Res.* **32**, 8–16, DOI:10.1016/j.lssr.2021.09.005.

Asamoah E.A., Le-Bail A., Oge A., Queveau D., Rouaud O. & Le-Bail P., 2023. Impact of Baking Powder and Leavening Acids on Batter and Pound Cake Properties. *Foods* **12**(5), 946, DOI:10.3390/foods12050946.

Asikin Y., Hirose N., Tamaki H., Ito S., Oku H. & Wada K., 2016. Effects of different drying–solidification processes on physical properties, volatile fraction, and antioxidant activity of non-centrifugal cane brown sugar. *LWT - Food Sci. Technol.* **66**, 340–347, DOI:10.1016/j.lwt.2015.10.039.

Bailey L. & Gregory III J., 2006. Folate. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 278–301.

Baldet P. & Colas F., 2012. Utiliser la mesure de l'activité de l'eau pour mieux conserver les semences forestières : une coopération fructueuse entre Irstea et la Direction de la recherche forestière au Québec. *Sci. Eaux Territ.* (Cahier spécial II), 20–25, DOI:10.14758/SET-REVUE.2012.CS2.04.

Barham P., 2001. *The Science of Cooking*, Berlin, Heidelberg: Springer.

Bates C., 2006. Thiamin. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 242–9.

Bayon-Vicente G., Marchand E., Ducrotois J., Dufrasne F.E., Hallez R., Wattiez R. & Leroy B., 2021.

Analysis of the Involvement of the Isoleucine Biosynthesis Pathway in Photoheterotrophic Metabolism of *Rhodospirillum rubrum*. *Front. Microbiol.* **12**.

Bayon-Vicente G., Wattiez R. & Leroy B., 2020. Global Proteomic Analysis Reveals High Light Intensity Adaptation Strategies and Polyhydroxyalkanoate Production in *Rhodospirillum rubrum* Cultivated With Acetate as Carbon Source. *Front. Microbiol.* **11**, 464, DOI:10.3389/fmicb.2020.00464.

Beal A.D. & Mottram D.S., 1994. Compounds contributing to the characteristic aroma of malted barley. *J. Agric. Food Chem.* **42**(12), 2880–2884, DOI:10.1021/jf00048a043.

Beard J., 2006. Iron. *In: Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 430–44.

Becker E.W., 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnol. Adv.* **25**(2), 207–210, DOI:10.1016/j.biotechadv.2006.11.002.

Bender D., Gratz M., Vogt S., Fauster T., Wicki B., Pichler S., Kinner M., Jäger H. & Schoenlechner R., 2019. Ohmic Heating—a Novel Approach for Gluten-Free Bread Baking. *Food Bioprocess Technol.* **12**(9), 1603–1613, DOI:10.1007/s11947-019-02324-9.

Benterud A., 1977. Physical, Chemical, and Biological Changes in Food Caused by Thermal Processing. *Appl. Sci. Lond.* 199.

Bergouignan A., Stein T.P., Hahold C., Coxam V., O' Gorman D. & Blanc S., 2016. Towards human exploration of space: The THESEUS review series on nutrition and metabolism research priorities. *Npj Microgravity* **2**(1), 1–8, DOI:10.1038/npjmgrav.2016.29.

Bimbenet J.-J., Schuck P., Roignant M., Brulé G. & Méjean S., 2002. Heat balance of a multistage spray-dryer: principles and example of application. *Le Lait* **82**(4), 541–551, DOI:10.1051/lait:2002031.

Blackwood A.M., Sagnella G.A., Cook D.G. & Cappuccio F.P., 2001. Urinary calcium excretion, sodium intake and blood pressure in a multi-ethnic population: results of the Wandsworth Heart and Stroke Study. *J. Hum. Hypertens.* **15**(4), 229–237, DOI:10.1038/sj.jhh.1001171.

Blomqvist T., 2020. Challenges in food system development for deep space missions (NY010 Agronomprogrammet - livsmedel, för antagna fr.o.m. 2016 300 HEC No. 2020:22), Food science and technology, Uppsala, Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences, 41.

Bourland C.T. & Vogt G.L., 2010. Desserts. *In: Bourland, C.T., Vogt, G.L. eds. The Astronaut's Cookbook: Tales, Recipes, and More*. New York, NY: Springer, 140–165.

Boutonnier J.-L., 2006. Matière grasse laitière - Composition, organisation et propriétés. *Agroalimentaire* DOI:10.51257/a-v1-f6320.

Bozkurt H. & Icier F., 2010. Ohmic cooking of ground beef: Effects on quality. *J. Food Eng.* **96**(4), 481–490, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2009.08.030.

Briguglio M., 2021. Nutritional Orthopedics and Space Nutrition as Two Sides of the Same Coin: A Scoping Review. *Nutrients* **13**(2), 483, DOI:10.3390/nu13020483.

Brillat-Savarin J., 2014. *Physiologie du goût*, Grasset, 346.

Brocca L., Cannavino J., Coletto L., Biolo G., Sandri M., Bottinelli R. & Pellegrino M.A., 2012. The time course of the adaptations of human muscle proteome to bed rest and the underlying mechanisms. *J. Physiol.* **590**(20), 5211–5230, DOI:10.1113/jphysiol.2012.240267.

- Broyart B., 1998. Modelisation des phenomenes de transferts et des modifications de qualite induites lors de la cuisson d'un biscuit sec en continu (These de doctorat).
- Brunet J., Gerbi O., André P., Elisabeth D., Rodriguez R., Carbonero F., Soumalainen E. & Lasseur C., 2010. Alisse : Advanced life support system evaluator.
- Bush M., 2020. Future is fresh: Creating a fresh crop system for extended space flight.
- Buttery R.G., Orts W.J., Takeoka G.R. & Nam Y., 1999. Volatile Flavor Components of Rice Cakes. *J. Agric. Food Chem.* **47**(10), 4353–4356, DOI:10.1021/jf990140w.
- Bychkov A., Reshetnikova P., Bychkova E., Podgorbunskikh E. & Koptev V., 2021. The current state and future trends of space nutrition from a perspective of astronauts' physiology. *Int. J. Gastron. Food Sci.* **24**, 100324, DOI:10.1016/j.ijgfs.2021.100324.
- Caballero B., Allen L. & Prentice A. (Eds.), 2005. *Encyclopedia of Human Nutrition*, Amsterdam Netherlands ; Boston: Academic Press, 2000.
- Cabecas Segura P., De Meur Q., Tanghe A., Onderwater R., Dewasme L., Wattiez R. & Leroy B., 2021. Effects of Mixing Volatile Fatty Acids as Carbon Sources on *Rhodospirillum rubrum* Carbon Metabolism and Redox Balance Mechanisms. *Microorganisms* **9**(9), 1996, DOI:10.3390/microorganisms9091996.
- Cabecas Segura P., Onderwater R., Deutschbauer A., Dewasme L., Wattiez R. & Leroy B., 2022. Study of the Production of Poly(Hydroxybutyrate-co-Hydroxyhexanoate) and Poly(Hydroxybutyrate-co-Hydroxyvalerate-co-Hydroxyhexanoate) in *Rhodospirillum rubrum*. *Appl. Environ. Microbiol.* **88**(6), e0158621, DOI:10.1128/AEM.01586-21.
- Camporeale G. & Zemleni J., 2006. Biotin. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 314–26.
- Canali G., Balestra F., Glicerina V., Pasini F., Caboni M.F. & Romani S., 2020. Influence of different baking powders on physico-chemical, sensory and volatile compounds in biscuits and their impact on textural modifications during soaking. *J. Food Sci. Technol.* **57**(10), 3864–3873, DOI:10.1007/s13197-020-04418-1.
- Cansell M., 2005. Impact de la cristallisation des corps gras sur les propriétés des produits finis. *Ol. Corps Gras Lipides* **12**(5–6), 427–431, DOI:10.1051/ocl.2005.0427.
- Caporgno M.P. & Mathys A., 2018. Trends in Microalgae Incorporation Into Innovative Food Products With Potential Health Benefits. *Front. Nutr.* **5**.
- Cappato L.P., Ferreira M.V.S., Guimaraes J.T., Portela J.B., Costa A.L.R., Freitas M.Q., Cunha R.L., Oliveira C.A.F., Mercali G.D., Marzack L.D.F. & Cruz A.G., 2017. Ohmic heating in dairy processing: Relevant aspects for safety and quality. *Trends Food Sci. Technol.* **62**, 104–112, DOI:10.1016/j.tifs.2017.01.010.
- CASTAIGNE F., 1992. Conservation, technologie et emballage des aliments. In: *L'activité de l'eau En Conservation*. Presented at the Les actes du 1er colloque agro-alimentaire de la francophonie Casablanca, Maroc: Agriculture Canada.
- Castro C., Coutinho F., Iglesias P., Oliva-Teles A. & Couto A., 2020. *Chlorella* sp. and *Nannochloropsis* sp. Inclusion in Plant-Based Diets Modulate the Intestine and Liver Antioxidant Mechanisms of European Sea Bass Juveniles. *Front. Vet. Sci.* **7**.

- Chaloulakou S., Poulika K.A. & Karayiannis D., 2022. Physiological Alterations in Relation to Space Flight: The Role of Nutrition. *Nutrients* **14**(22), 4896, DOI:10.3390/nu14224896.
- Chew K.W., Chia S.R., Show P.L., Yap Y.J., Ling T.C. & Chang J.-S., 2018. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* **91**, 332–344, DOI:10.1016/j.jtice.2018.05.039.
- Chia S.S., Baker R.C. & Hotchkiss J.H., 1983. Quality Comparison of Thermoprocessed Fishery Products in Cans and Retortable Pouches. *J. Food Sci.* **48**(5), 1521–1525, DOI:10.1111/j.1365-2621.1983.tb03529.x.
- Chizoba Ekezie F.-G., Sun D.-W., Han Z. & Cheng J.-H., 2017. Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends Food Sci. Technol.* **67**, 58–69, DOI:10.1016/j.tifs.2017.05.014.
- Chung H.-J., Liu Q., Lee L. & Wei D., 2011. Relationship between the structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of rice starches with different amylose contents. *Food Hydrocoll.* **25**(5), 968–975, DOI:10.1016/j.foodhyd.2010.09.011.
- CNA, 2009. GUIDE D'AIDE À LA GESTION DES ALERTES D'ORIGINE ALIMENTAIRE entre les exploitants de la chaîne alimentaire et l'administration lorsqu'un produit ou un lot de produits est identifié.
- Cochet B., Jung A., Griessen M., Bartholdi P., Schaller P. & Donath A., 1983. Effects of lactose on intestinal calcium absorption in normal and lactase-deficient subjects. *Gastroenterology* **84**(5 Pt 1), 935–940.
- Codex Alimentarius, FAO & OMS, 1999. NORME POUR LES LAITS EN POUDRE ET LA CRÈME EN POUDRE (Normes No. CODEX STAN 207-1999), Codex alimentarius.
- Coisne J. & Grandsire J., 2008. *Sélection d'astronautes européens*, Une Production ESA Communications, Allemagne: A. Wilson.
- Collomb M., Bütikofer U., Spahni M., Jeangros B. & Bosset J.O., 1999. Composition en acides gras et en glycérides de la matière grasse du lait de vache en zones de montagne et de plaine. (Fatty acid and glyceride composition of cow's milk fat in high- and lowland regions). *Sci. Aliments* **19**, 97–110.
- Cooper M., Douglas G. & Perchonok M., 2011. Developing the NASA Food System for Long-Duration Missions. *J. Food Sci.* **76**(2), R40–R48, DOI:10.1111/j.1750-3841.2010.01982.x.
- Coppens J., Lindeboom R., Muys M., Coessens W., Alloul A., Meerbergen K., Lievens B., Clauwaert P., Boon N. & Vlaeminck S.E., 2016. Nitrification and microalgae cultivation for two-stage biological nutrient valorization from source separated urine. *Bioresour. Technol.* **211**, 41–50, DOI:10.1016/j.biortech.2016.03.001.
- Costa M.L., Costa M.G.O., de Souza M.F.C., da Silva D.G., dos Santos Vieira D.A. & Mendes-Netto R.S., 2022. Cognitive restraint, emotional eating and uncontrolled eating: Exploring factors associated with the cycle of behaviors during the COVID-19 pandemic. *Food Qual. Prefer.* **100**, 104579, DOI:10.1016/j.foodqual.2022.104579.
- Cousins R., 2006. Zinc. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 445–57.
- CSS, 2016. Recommandations nutritionnelles pour la Belgique (Avis No. 9285), Bruxelles, Conseil Supérieur de la Santé.

Curet S., 2019. *Procédés de chauffage par micro-ondes : approches expérimentales et numériques des interactions avec les produits alimentaires*.

Dahmoune F., Nayak B., Moussi K., Remini H. & Madani K., 2015. Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Polyphenols from *Myrtus communis* L. Leaves. *Food Chem.* DOI:10.1016/j.foodchem.2014.06.066.

Danthine S., 2010. Technofonctionnalité des lipides alimentaires. Presented at the Les stratégies de réduction/ substitution des matières grasses.

Darvishi H., Khostaghaza M.H. & Najafi G., 2013. Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* **12**(2), 101–108, DOI:10.1016/j.jssas.2012.08.003.

Datta A.K. & Anantheswaran R.C., 2001. *Handbook of Microwave Technology for Food Application*, CRC Press, 544.

Datta A.K. & Davidson P.M., 2000. Microwave and Radio Frequency Processing. *J. Food Sci.* **65**(s8), 32–41, DOI:10.1111/j.1750-3841.2000.tb00616.x.

Dautant F.J., Simancas K., Sandoval A.J. & Müller A.J., 2007. Effect of temperature, moisture and lipid content on the rheological properties of rice flour. *J. Food Eng.* **78**(4), 1159–1166, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.12.028.

Davies K.M., Rafferty K. & Heaney R.P., 2004. Determinants of endogenous calcium entry into the gut. *Am. J. Clin. Nutr.* **80**(4), 919–923, DOI:10.1093/ajcn/80.4.919.

De Paepe J., De Paepe K., Gòdia F., Rabaey K., Vlaeminck S.E. & Clauwaert P., 2020. Bio-electrochemical COD removal for energy-efficient, maximum and robust nitrogen recovery from urine through membrane aerated nitrification. *Water Res.* **185**, 116223, DOI:10.1016/j.watres.2020.116223.

Debry G., 2000. *Lait, nutrition et santé*, Paris: Tec & Doc - Lavoisier, 566 p.

Decareau R.V., 1992. *Microwave Foods: ew Product Development*, Taylor & Francis, 213.

D'Hondt L., Mabillard M. & Béka M., 2022. Conception de snacks apéritifs à base de drêches de brasserie.

Dornoush J. & Bagher H.S.M., 2022. OHMIC HEATING APPLICATION IN FOOD PROCESSING: RECENT ACHIEVEMENTS AND PERSPECTIVES. *Foods Raw Mater.* **10**(2), 216–223.

Douglas G.L., Zwart S.R. & Smith S.M., 2020. Space Food for Thought: Challenges and Considerations for Food and Nutrition on Exploration Missions. *J. Nutr.* **150**(9), 2242–2244, DOI:10.1093/jn/nxaa188.

Dupin H., Cuq J.-L., Malewiak M.-I., Leynaud-Rouaud C. & Berthier A.-M., 1992. *Alimentation et nutrition humaines*, Paris: ESF, 1533 p.

Dusso A.S., Brown A.J. & Slatopolsky E., 2005. Vitamin D. *Am. J. Physiol. Renal Physiol.* **289**(1), F8-28, DOI:10.1152/ajprenal.00336.2004.

EFSA, 2005. Opinion of the Scientific Panel on Dietetic products, nutrition and allergies [NDA] on a request from the Commission related to the Tolerable Upper Intake Level of Chloride. *EFSA J.* (EFSA-Q-2003-018), DOI:10.2903/j.efsa.2005.210.

EFSA & Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA), 2013. Scientific Opinion on Dietary Reference Values for energy. *EFSA J.* **11**(1), 3005, DOI:10.2903/j.efsa.2013.3005.

- El-Hajjaji S., 2022. Study of the behavior of *Listeria monocytogenes* in raw milk butter.
- Evans S.R., Iii J.F.G. & Kirk J.R., 1981. Thermal Degradation Kinetics of Pyridoxine Hydrochloride in Dehydrated Model Food Systems. *J. Food Sci.* **46**(2), 555–558, DOI:10.1111/j.1365-2621.1981.tb04909.x.
- Fahrion J., Mastroleo F., Dussap C.-G. & Leys N., 2021. Use of Photobioreactors in Regenerative Life Support Systems for Human Space Exploration. *Front. Microbiol.* **12**.
- Fang Y.-Z., Yang S. & Wu G., 2002. Free radicals, antioxidants, and nutrition. *Nutr. Burbank Los Angel. Cty. Calif* **18**(10), 872–879, DOI:10.1016/s0899-9007(02)00916-4.
- Feillet P., 2000. *Le grain de blé: Composition et utilisation*, Editions Quae, 316.
- Fellows P.J., 2016. *Food Processing Technology: Principles and Practice*, Amsterdam ; Cambridge, MA: Woodhead Publishing, 1152.
- Ferreira de Oliveira A.P. & Bragotto A.P.A., 2022. Microalgae-based products: Food and public health. *Future Foods* **6**, 100157, DOI:10.1016/j.fufo.2022.100157.
- Fiddaman P.J. & Rossall S., 1994. Effect of substrate on the production of antifungal volatiles from *Bacillus subtilis*. *J. Appl. Bacteriol.* **76**(4), 395–405, DOI:10.1111/j.1365-2672.1994.tb01646.x.
- Fors S., Waller G.R. & Feather M.S., 1983. Sensory properties of volatile maillard reaction products and related compounds : a literature review. In: *The Maillard Reaction in Foods and Nutrition*, ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 185–286.
- Fradique M., Batista A.P., Nunes M.C., Gouveia L., Bandarra N.M. & Raymundo A., 2010. Incorporation of *Chlorella vulgaris* and *Spirulina maxima* biomass in pasta products. Part 1: Preparation and evaluation. *J. Sci. Food Agric.* **90**(10), 1656–1664, DOI:10.1002/jsfa.3999.
- Franco A., Scieuzo C., Salvia R., Petrone A.M., Tafi E., Moretta A., Schmitt E. & Falabella P., 2021. Lipids from *Hermetia illucens*, an Innovative and Sustainable Source. *Sustainability* **13**(18), 1–23.
- Franco A.P., Yamamoto L.Y., Tadini C.C. & Gut J.A.W., 2015. Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: Effect of temperature and field frequency. *J. Food Eng.* **155**, 69–78, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.01.011.
- Frankel E.N., 2005. *Lipid Oxidation*, Bridgwater: Oily Press, 488.
- Gally T., Rouaud O., Jury V. & Le-Bail A., 2016. Bread baking using ohmic heating technology; a comprehensive study based on experiments and modelling. *J. Food Eng.* **190**, 176–184, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.06.029.
- Gao R. & Chilibeck P.D., 2020. Nutritional interventions during bed rest and spaceflight: prevention of muscle mass and strength loss, bone resorption, glucose intolerance, and cardiovascular problems. *Nutr. Res.* **82**, 11–24, DOI:10.1016/j.nutres.2020.07.001.
- Garcia-Gragera D., Peiro E., Arnau C., Cornet J.-F., Dussap C.-G. & Godia F., 2022. Dynamics of long-term continuous culture of *Limnospira indica* in an air-lift photobioreactor. *Microb. Biotechnol.* **15**(3), 931–948, DOI:10.1111/1751-7915.13882.
- Gavahian M., Tiwari B.K., Chu Y.-H., Ting Y. & Farahnaky A., 2019. Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recent findings, benefits, and limitations. *Trends Food Sci. Technol.* **86**, 328–339, DOI:10.1016/j.tifs.2019.02.022.

- Gharibzahedi S.M.T., 2018. Favorite and traditional rice flour–based puddings, breads, and pastries in the north of Iran: A review. *J. Ethn. Foods* **5**(2), 105–113, DOI:10.1016/j.jef.2018.03.001.
- Girardin-Andréani C., 2005. Spiruline: système sanguin, système immunitaire et cancer*. *Phytotherapie* **3**(4), 158–161, DOI:10.1007/s10298-005-0095-9.
- Global Space Food Market Research Report 2022 (No. QYR68508), 2022. , New York City, Xcellent Insights.
- Gohara-Beirigo A.K., Matsudo M.C., Cezare-Gomes E.A., Carvalho J.C.M. de & Danesi E.D.G., 2022. Microalgae trends toward functional staple food incorporation: Sustainable alternative for human health improvement. *Trends Food Sci. Technol.* **125**, 185–199, DOI:10.1016/j.tifs.2022.04.030.
- Groff J. & Gropper S., 2000. *Advanced nutrition and human metabolism*, St. Paul, MN: Wadsworth Publishing.
- Gueguen L., 2002. Quoi de neuf sur le calcium et la santé? *NAFAS Sci.* **7**, 13–20.
- Guezennec C.-Y. & Bigard X., 2017. Les glucides. In: *Nutrition Du Sportif*, Collection Sport. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson, 23–48.
- Hackney K.J., Scott J.M., Hanson A.M., English K.L., Downs M.E. & Ploutz-Snyder L.L., 2015. The Astronaut-Athlete: Optimizing Human Performance in Space. *J. Strength Cond. Res.* **29**(12), 3531–3545, DOI:10.1519/JSC.0000000000001191.
- Häuplik-Meusburger S. & Bishop S., 2021. Habitability as SPACE. *Space Habitats Habitability* 25–49, DOI:10.1007/978-3-030-69740-2_3.
- Heer M., 2002. Nutritional interventions related to bone turnover in European space missions and simulation models. *Nutr. Burbank Los Angel. Cty. Calif* **18**(10), 853–856, DOI:10.1016/s0899-9007(02)00905-x.
- Heidelbaugh N.D., 1966. Space flight feeding concepts: Characteristics, concepts for improvement, and public health implications. In: *Aerospace Medical Division*. Air Force School of Aerospace Medicine.
- Herron K.L. & Fernandez M.L., 2004. Are the current dietary guidelines regarding egg consumption appropriate? *J. Nutr.* **134**(1), 187–190, DOI:10.1093/jn/134.1.187.
- Hill A. & ILSI, 1998. Microwave Ovens – ILSI Europe. *Int. Life Sci. Inst.*
- Ho S.C., Chen Y.M., Woo J.L., Leung S.S., Lam T.H. & Janus E.D., 2001. Sodium is the leading dietary factor associated with urinary calcium excretion in Hong Kong Chinese adults. *Osteoporos. Int. J. Establ. Result Coop. Eur. Found. Osteoporos. Natl. Osteoporos. Found. USA* **12**(9), 723–731, DOI:10.1007/s001980170047.
- Holick M.F., Chen T.C., Lu Z. & Sauter E., 2007. Vitamin D and skin physiology: a D-lightful story. *J. Bone Miner. Res. Off. J. Am. Soc. Bone Miner. Res.* **22 Suppl 2**, V28-33, DOI:10.1359/jbmr.07s211.
- Hollender H.A., Klicka M.V. & Smith M.C., 1970. Food technology problems related to space feeding. *Life Sci. Space Res.* **8**, 265–279.
- Hwang J.-H. & Lee K.-G., 2006. Reduction of aflatoxin B1 contamination in wheat by various cooking treatments. *Food Chem.* **98**(1), 71–75, DOI:10.1016/j.foodchem.2005.04.038.
- Icier F., 2012. Chapter 11 - Ohmic Heating of Fluid Foods. In: Cullen, P.J., Tiwari, B.K., Valdramidis, V.P.

eds. *Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods*. San Diego: Academic Press, 305–367.

Institute of Medicine, 2000. Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids, Washington, DC, The National Academies Press.

IOF US & Institute of Medicine (US) Standing Committee on the Scientific Evaluation of Dietary Reference Intakes, 1997. *Dietary Reference Intakes for Calcium, Phosphorus, Magnesium, Vitamin D, and Fluoride*, The National Academies Collection: Reports funded by National Institutes of Health, Washington (DC): National Academies Press (US).

IOM, 2005. *Dietary Reference Intakes for Water, Potassium, Sodium, Chloride, and Sulfate*, Washington, D.C.: National Academies Press.

Izzo L.G., Romano L.E., Muthert L.W.F., Iovane M., Capozzi F., Manzano A., Ciska M., Herranz R., Medina F.J., Kiss J.Z., van Loon J.J.W.A. & Aronne G., 2022. Interaction of gravitropism and phototropism in roots of *Brassica oleracea*. *Environ. Exp. Bot.* **193**, 104700, DOI:10.1016/j.envexpbot.2021.104700.

Jackson H.A. & Sheehan A.H., 2005. Effect of vitamin A on fracture risk. *Ann. Pharmacother.* **39**(12), 2086–2090, DOI:10.1345/aph.1G028.

Jacob R., 2006. Niacin. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 260–8.

Jafarpour D. & Hashemi S.M.B., 2022. Ohmic heating application in food processing: Recent achievements and perspectives. *Foods Raw Mater.* 216–223, DOI:10.21603/2308-4057-2022-2-531.

Janssen P.J.D., Lambreva M.D., Plumeré N., Bartolucci C., Antonacci A., Buonasera K., Frese R.N., Scognamiglio V. & Rea G., 2014. Photosynthesis at the forefront of a sustainable life. *Front. Chem.* **2**, 36, DOI:10.3389/fchem.2014.00036.

Jayas D.S., 2016. Food Dehydration. In: *Reference Module in Food Science*. Elsevier.

Jiang J., Zhang M., Bhandari B. & Cao P., 2020. Current processing and packing technology for space foods: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **60**(21), 3573–3588, DOI:10.1080/10408398.2019.1700348.

Johnson C., 2006. Vitamin C. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 233–41.

Jun S. & Sastry S., 2005. Modeling and optimization of ohmic heating of foods inside a flexible package. *J. Food Process Eng.* **28**, 417–436, DOI:10.1111/j.1745-4530.2005.00032.x.

Kanjanapongkul K., 2017. Rice cooking using ohmic heating: Determination of electrical conductivity, water diffusion and cooking energy. *J. Food Eng.* **192**, 1–10, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.07.014.

Katayama N., Ueno H., Aoki C., Furuhashi K., Kubo Y., Miyashita S., Yamashita M., Katou M. & Tokunaga S., 2009. Let us enjoy delicious space foods - It enhances health and solves the food problem on Earth -. In: *2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*. Presented at the 2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 58–60.

Kaur N. & Singh A.K., 2016. Ohmic Heating: Concept and Applications—A Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **56**(14), 2338–2351, DOI:10.1080/10408398.2013.835303.

Khoshvaghti A., 2019. Vitamin D in Space. In: *Fads and Facts about Vitamin D*. IntechOpen, 63–76.

Kiger J.L. & Kiger J.-G., 1967. *Techniques modernes de la biscuiterie, pâtisserie-boulangerie industrielles et artisanales et des produits de régime: par J.L. Kiger ... J.G. Kiger ...*, Dunod, book.

- Kiosseoglou V. & Paraskevopoulou A., 2005. Molecular interactions in gels prepared with egg yolk and its fractions. *Food Hydrocoll.* - *FOOD HYDROCOLLOID* **19**, 527–532, DOI:10.1016/j.foodhyd.2004.10.027.
- Kleinman L. & Lorenz J., 1984. Physiology and pathophysiology of body water and electrolytes. *In: Clinical Chemistry: Theory, Analysis, and Correlation*. St.-Louis, MO: CV Mosby Company, 363–86.
- Klicka M.V. & Smith M.C., 1982. Food for U.S. Manned Space Flight (TECHNICAL REPORT No. NATICK I TR-82 I 019), NATICK, MASSACHUSETTS, FOOD ENGINEERING LABORATORY.
- Klinthong W., Yang Y.-H., Huang C.-H. & Tan C.-S., 2015. A Review: Microalgae and Their Applications in CO₂ Capture and Renewable Energy. *Aerosol Air Qual. Res.* **15**(2), 712–742, DOI:10.4209/aaqr.2014.11.0299.
- Kohlmeier L. & Hastings S.B., 1995. Epidemiologic evidence of a role of carotenoids in cardiovascular disease prevention. *Am. J. Clin. Nutr.* **62**(6 Suppl), 1370S-1376S, DOI:10.1093/ajcn/62.6.1370S.
- Kropf D.H., Yancey J.W.S. & Yancey E.J., 2014. PACKAGING | Technology and Films. *In: Dikeman, M., Devine, C. eds. Encyclopedia of Meat Sciences (Second Edition)*. Oxford: Academic Press, 19–25.
- Lagorce S. & l'équipe de 180°C des recettes et des hommes, 2016. Les pâtes jaunes. *In: Traité de Miamologie - La Pâtisserie*. 109–1014.
- Lane H. & Rambaut P., 1994. Nutrition. *In: Space Physiology and Medicine*. Philadelphia: Lea and Febiger, 305.
- Lasseur C., Brunet J., de Weever H., Dixon M., Dussap G., Godia F., Leys N., Mergeay M. & Van Der Straeten D., 2010. MELISSA: THE EUROPEAN PROJECT OF CLOSED LIFE SUPPORT SYSTEM. *Gravitational Space Biol. Bull. Publ. Am. Soc. Gravitational Space Biol.* **23**(2), 3–12.
- Leach C., Alexander W. & Johnson P., 1975. Endocrine, electrolyte, and fluid volume changes associated with Apollo missions (No. Biomedical results of Apollo (NASA SP-368).), Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration.
- Leach C.S., 1992. Biochemical and hematologic changes after short-term space flight. *Microgravity Q. MGQ* **2**(2), 69–75.
- Leach C.S. & Rambaut P.C., 1977. Biochemical responses of the Skylab crewmen: An overview.
- Łechtańska J., Szadzińska J. & Kowalski S.J., 2015. Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* **98**, DOI:10.1016/j.cep.2015.10.001.
- Léonard P., 2021. CdCF emballage - Exemple de grille d'évaluation - Pascal Léonard - Ing [Document Word].
- Lerat S., 1968. Angladette (A.). Le riz. Techniques agricoles et productions tropicales, 1966. *Cah. O.-m.* **21**(82), 219–219.
- Levri J.A., Fisher J.W., Jones H.W., Drysdale A.E., Ewert M.K., Hanford A.J., Hogan J.A., Joshi J.A. & Vaccari D.A., 2003. Advanced life support equivalent system mass guidelines document, NASA.
- Liakopoulos V., Leivaditis K., Eleftheriadis T. & Dombros N., 2012. The kidney in space. *Int. Urol. Nephrol.* **44**(6), 1893–1901, DOI:10.1007/s11255-012-0289-7.

- Lindeboom R.E.F., De Paepe J., Vanoppen M., Alonso-Fariñas B., Coessens W., Alloul A., Christiaens M.E.R., Dotremont C., Beckers H., Lamaze B., Demey D., Clauwaert P., Verliefde A.R.D. & Vlaeminck S.E., 2020. A five-stage treatment train for water recovery from urine and shower water for long-term human Space missions. *Desalination* **495**, 114634, DOI:10.1016/j.desal.2020.114634.
- Linstrom P.J. & Mallard W.G., 2001. The NIST Chemistry WebBook: A Chemical Data Resource on the Internet. *NIST* **46**(No. 5), 1059–1063.
- Liu J., Wan P., Xie C. & Chen D.-W., 2021. Key aroma-active compounds in brown sugar and their influence on sweetness. *Food Chem.* **345**, 128826, DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128826.
- Long Y., Zhang M., Devahastin S. & Cao P., 2022. Progresses in processing technologies for special foods with ultra-long shelf life. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **62**(9), 2355–2374, DOI:10.1080/10408398.2020.1853034.
- Ma Z., Ahmed F., Yuan B. & Zhang W., 2019. Fresh living *Arthrospira* as dietary supplements: Current status and challenges. *Trends Food Sci. Technol.* **88**, 439–444, DOI:10.1016/j.tifs.2019.04.010.
- MacRitchie F., 1984. Baking quality of wheat flours. *Advanced Food Research* (29), 201–277.
- Mahdi R.A., 2006. Mise au point et caractérisation de films comestibles à base de polysaccharides et de matières grasses : (phdthesis).
- Maloney N. & Harrison M., 2016. Advanced Heating Technologies for Food Processing. *Innov. Future Trends Food Manuf. Supply Chain Technol.* 203–256, DOI:10.1016/B978-1-78242-447-5.00008-3.
- Manickavasagan A., Jayas D. & White N., 2006. Non-Uniformity of Surface Temperatures of Grain after Microwave Treatment in an Industrial Microwave Dryer. *Dry. Technol. - DRY TECHNOL* **24**, 1559–1567, DOI:10.1080/07373930601030796.
- Markou G., Vandamme D. & Muylaert K., 2014. Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients. *Water Res.* **65**, 186–202, DOI:10.1016/j.watres.2014.07.025.
- Martin A., 2001. The "apports nutritionnels conseillés (ANC)" for the French population. *Reprod. Nutr. Dev.* **41**(2), 119–128.
- Martinez-Ceniceros M., Fernandez-Monreal K., Domínguez-Ordaz L.E., Ayala-Soto J.G., Chavez-Flores D., Ruiz-Anchondo T., Sandoval-Salas F., Neder-Suarez D. & Hernandez-Ochoa L., 2022. The effect of cooking with retort pouch system on lipid and phaseolin composition of Pinto Saltillo beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food Sci. Technol.* **42**, DOI:10.1590/fst.94721.
- Mastroleo F., Arnau C., Verbeelen T., Mysara M., Gòdia F., Leys N. & Van Houdt R., 2022. Metaproteomics, Heterotrophic Growth, and Distribution of *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* after Long-Term Operation of an Autotrophic Nitrifying Biofilm Reactor. *Appl. Microbiol.* **2**(1), 272–287, DOI:10.3390/applmicrobiol2010020.
- Mavrou P., Thorpe R., Frith W., Lian G. & Chen T., 2018. Mathematical modelling of moisture migration in confectionery multicomponent food systems. In: Friedl, A., Klemeš, J.J., Radl, S., Varbanov, P.S., Wallek, T. eds. *Computer Aided Chemical Engineering, 28 European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Elsevier, 1625–1630.
- McMonigal K., Sauer R. & Smith S., 2002. Physiological effects of iodinated water on thyroid function. In: *Isolation: NASA Experiments in Closed-Environment Living*. San Diego: Univelt, Inc., 369–95.

- McMonigal K.A., Braverman L.E., Dunn J.T., Stanbury J.B., Wear M.L., Hamm P.B., Sauer R.L., Billica R.D. & Pool S.L., 2000. Thyroid function changes related to use of iodinated water in the U.S. Space Program. *Aviat. Space Environ. Med.* **71**(11), 1120–1125.
- Meda V., Orsat V. & Raghavan V., 2017. 2 - Microwave heating and the dielectric properties of foods. *In: Regier, M., Knoerzer, K., Schubert, H. eds. The Microwave Processing of Foods (Second Edition)*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, 23–43.
- Megahey E.K., McMinn W.A.M. & Magee T.R.A., 2005. Experimental Study of Microwave Baking of Madeira Cake Batter. *Food Bioprod. Process.* **83**(4), 277–287, DOI:10.1205/fbp.05033.
- Mello P.A., Barin J.S. & Guarnieri R.A., 2014. Chapter 2 - Microwave Heating. *In: Flores, É.M. de M. ed. Microwave-Assisted Sample Preparation for Trace Element Analysis*. Amsterdam: Elsevier, 59–75.
- Mendez M.L.R., 2016. *Electronic Noses and Tongues in Food Science*, Elsevier Science, 332.
- Mendonça C.R., Rodrigues R. da S. & Zambiasi R.C., 2000. Açúcar mascavo em geleadas de maçã. *Ciênc. Rural* **30**, 1053–1058, DOI:10.1590/S0103-84782000000600022.
- Metaxas A.C. & Meredith R.J., 1983. *Industrial Microwave Heating*, IET, 380.
- Meuser F. & Suckow P., 1986. Non-Starch Polysaccharides. *In: Chemistry and Physics of Baking*, The Royan Society of Science. London, 42–62.
- Michels F. & Dandois Y., 2021. Conception d'un pain sans gluten et de son four ohmique.
- Mil P.J.J.M. van & Jans J.A., 1991. Storage stability of whole milk powder: effects of process and storage conditions on product properties. *Neth. Milk Dairy J. Neth.*
- Miller J., Rogers L. & Rucker R., 2006. Pantothenic acid. *In: Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 327–39.
- Mine Y., 2002. Recent advances in egg protein functionality in the food system. *Worlds Poult. Sci. J.* **58**(1), 31–39, DOI:10.1079/WPS20020005.
- Moreira R.G. & Castell-Perez M.E., 2021. 2.01 - Fundamentals of Food Irradiation. *In: Knoerzer, K., Muthukumarappan, K. eds. Innovative Food Processing Technologies*. Oxford: Elsevier, 1–18.
- Morin O. & Pagès-Xatart-Parès X., 2012. Huiles et corps gras végétaux : ressources fonctionnelles et intérêt nutritionnel. *Ol. Corps Gras Lipides* **19**(2), 63–75, DOI:10.1051/ocl.2012.0446.
- Musto M., Faraone D., Cellini F. & Musto E., 2014. Changes of DNA quality and meat physicochemical properties in bovine supraspinatus muscle during microwave heating. *J. Sci. Food Agric.* **94**(4), 785–791, DOI:10.1002/jsfa.6441.
- Muys M., Sui Y., Schwaiger B., Lesueur C., Vandenheuvél D., Vermeir P. & Vlaeminck S.E., 2019. High variability in nutritional value and safety of commercially available Chlorella and Spirulina biomass indicates the need for smart production strategies. *Bioresour. Technol.* **275**, 247–257, DOI:10.1016/j.biortech.2018.12.059.
- Naman Shafiee M., 2017. Space Food Technology: Production and Recent Developments Nom de la revue : International Journal of Advancements in Research & Technology. *Int. J. Adv. Res. Technol.* **6**(2), 120–129.
- NASA JSC, 2005. *Nutrition Requirements, Standards, and Operating Bands for Exploration Missions*,

Nutritional Biochemistry Laboratory Human Adaptation and Countermeasures Office Space Life Sciences Directorate NASA Johnson Space Center, 145.

Natoli S., Markovic T., Lim D., Noakes M. & Kostner K., 2007. Unscrambling the research: Eggs, serum cholesterol and coronary heart disease. *Nutr. Diet.* **64**(2), 105–111, DOI:10.1111/j.1747-0080.2007.00093.x.

Nouri E., Abbasi H. & Rahimi E., 2018. Effects of processing on stability of water- and fat-soluble vitamins, pigments (C-phycocyanin, carotenoids, chlorophylls) and colour characteristics of *Spirulina platensis* **10**(4), 335–349, DOI:10.3920/QAS2018.1304.

Nowicka-Krawczyk P., Mühlsteinová R. & Hauer T., 2019. Detailed characterization of the *Arthrospira* type species separating commercially grown taxa into the new genus *Limnospira* (Cyanobacteria). *Sci. Rep.* **9**(1), 694, DOI:10.1038/s41598-018-36831-0.

Obara A., Obiedziński M. & Kołczak T., 2006. The effect of water activity on cholesterol oxidation in spray- and freeze-dried egg powders. *Food Chem.* **95**(2), 173–179, DOI:10.1016/j.foodchem.2004.06.021.

Obrist M., Tu Y., Yao L. & Velasco C., 2019. Space Food Experiences: Designing Passenger's Eating Experiences for Future Space Travel Scenarios. *Front. Comput. Sci.* **1**.

Oh M. & Uribarri J., 1999. Electrolytes, water, and acid-base balance. In: *Modern Nutrition in Health and Disease*. Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins, 105–140.

Ohlsson T. & Bengtsson N., 2001. Microwave technology and foods. *Adv. Food Nutr. Res.* **43**, 65–140, DOI:10.1016/s1043-4526(01)43003-8.

Olson J., 1994. Vitamin A, retinoids, and carotenoids. In: *Modern Nutrition in Health and Disease*. Malvern, PA: Lea & Febiger, 287–307.

Olson R.E., 1984. The function and metabolism of vitamin K. *Annu. Rev. Nutr.* **4**, 281–337, DOI:10.1146/annurev.nu.04.070184.001433.

Oluwafemi F.A., Abdelbaki R., Lai J.C.-Y., Mora-Almanza J.G. & Afolayan E.M., 2021. A review of astronaut mental health in manned missions: Potential interventions for cognitive and mental health challenges. *Life Sci. Space Res.* **28**, 26–31, DOI:10.1016/j.lssr.2020.12.002.

Oluwafemi F.A., De La Torre A., Afolayan E.M., Olalekan-Ajayi B.M., Dhital B., Mora-Almanza J.G., Potrivitu G., Creech J. & Rivolta A., 2018. Space Food and Nutrition in a Long Term Manned Mission. *Adv. Astronaut. Sci. Technol.* **1**(1), 1–21, DOI:10.1007/s42423-018-0016-2.

Orlandi R., Verruma-Bernardi M., Sartorio S. & Borges M., 2017. Physicochemical and Sensory Quality of Brown Sugar: Variables of Processing Study. *J. Agric. Sci.* **9**(2), p115, DOI:10.5539/jas.v9n2p115.

Palacios C., 2006. The role of nutrients in bone health, from A to Z. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **46**(8), 621–628, DOI:10.1080/10408390500466174.

Pandith J.A., Neekhra S., Ahmad S. & Sheikh R.A., 2022. Recent developments in space food for exploration missions: A review. *Life Sci. Space Res.* DOI:10.1016/j.lssr.2022.09.007.

Pan-utai W. & lamtham S., 2023. Chapter 24 - Techno-functional properties of microalgae in food products. In: Jacob-Lopes, E., Queiroz, M.I., Maroneze, M.M., Zepka, L.Q. eds. *Handbook of Food and Feed from Microalgae*. Academic Press, 293–304.

- Pence B. & Yang T., 2000. Antioxidants: Radiation and stress. *In: Nutrition in Spaceflight and Weightlessness Models*. Boca Raton, FL: CRC Press, 233–252.
- Perchonok M. & Bourland C., 2002. NASA food systems: Past, present, and future. *Nutrition* **18**(10), 913–920, DOI:10.1016/S0899-9007(02)00910-3.
- Petrucelli L. & Fisher G.H., 1994. D-aspartate and D-glutamate in microwaved versus conventionally heated milk. *J. Am. Coll. Nutr.* **13**(2), 209–210, DOI:10.1080/07315724.1994.10718397.
- Piette G., Buteau M. I., de Halleux D., Chiu L., Raymond Y., Ramaswamy H. s. & Dostie M., 2004. Ohmic Cooking of Processed Meats and its Effects on Product Quality. *J. Food Sci.* **69**(2), fep71–fep78, DOI:10.1111/j.1365-2621.2004.tb15512.x.
- Pincemail J., 2014. *Stress oxydant et Antioxydants - Revue critique des processus d'action des antioxydants*, Embourg (Belgique): TESTEZ, 282.
- Pomeranz Y., 1988. Chemical composition of kernel structures. *Wheat Chem. Technol. Vol. I* (Ed. 3), 97–158.
- Poughon L., Creuly C., Farges B., Dussap C.-G., Schiettecatte W., Jovetic S. & De Wever H., 2013. Test of an anaerobic prototype reactor coupled with a filtration unit for production of VFAs. *Bioresour. Technol.*, Special Issue: IBS 2012 & Special Issue: IFIBiop **145**, 240–247, DOI:10.1016/j.biortech.2012.12.052.
- Poughon L., Creuly C., Godia F., Leys N. & Dussap C.-G., 2021. Photobioreactor *Limnospira indica* Growth Model: Application From the MELISSA Plant Pilot Scale to ISS Flight Experiment. *Front. Astron. Space Sci.* **8**.
- Poughon L., Laroche C., Creuly C., Dussap C.-G., Paille C., Lasseur C., Monsieurs P., Heylen W., Coninx I., Mastroleo F. & Leys N., 2020. *Limnospira indica* PCC8005 growth in photobioreactor: model and simulation of the ISS and ground experiments. *Life Sci. Space Res.* **25**, 53–65, DOI:10.1016/j.lssr.2020.03.002.
- Powers H.J., 2003. Riboflavin (vitamin B-2) and health. *Am. J. Clin. Nutr.* **77**(6), 1352–1360, DOI:10.1093/ajcn/77.6.1352.
- Preuss H., 2001. Sodium, chloride, and potassium. *In: Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 302–10.
- Prohaska J., 2006. Copper. *In: Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 458–70.
- Prokhonchukov A.A., Taitsev V.P., Shakhunov B.A., Zhizhina V.A., Kolesnik A.G. & Komissarova N.A., 1979. Effect of space flight on sodium, copper, manganese and magnesium content in the skeletal bones.
- Pruvost J., Cornet J.-F., Le Borgne F. & Jenck J., 2017. Production industrielle de microalgues et de cyanobactéries. *Chim. Verte* DOI:10.51257/a-v1-chv4030.
- Qian H. & Zhang H., 2013. 22 - Rice flour and related products. *In: Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M., Schuck, P. eds. Handbook of Food Powders*, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Woodhead Publishing, 553–575.
- Ramaswamy H.S., n.d. *Ohmic Heating in Food Processing*.
- RAZAFIMAHEFA, SOLOFONIAINA T.E., VOLOLONIRINA R.F., FANAMBINANTSOA F.R., TSIALY J.L. &

RANDRIANANTENAINA A., 2021. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, PHYSICO-CHIMIQUES ET FONCTIONNELLES DE LA FARINE DU RIZ "MAMORIAKA MENA." *Rev. Sci. Technol. Environ.* **4**, 68–77.

Règlement (CE) n° 1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 2006. , OJ L.

Règlement (CE) n° 2073/2005 de la Commission du 15 novembre 2005 concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), 2005. , OJ L.

Règlement (UE) 2015/2283, 2015. Règlement (UE) 2015/2283 du Parlement européen et du Conseil du 25 novembre 2015 relatif aux nouveaux aliments, modifiant le règlement (UE) n° 1169/2011 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant le règlement (CE) n° 258/97 du Parlement européen et du Conseil et le règlement (CE) n° 1852/2001 de la Commission (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE), OJ L.

Règlement (UE) n° 1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, modifiant les règlements (CE) n° 1924/2006 et (CE) n° 1925/2006 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 87/250/CEE de la Commission, la directive 90/496/CEE du Conseil, la directive 1999/10/CE de la Commission, la directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil, les directives 2002/67/CE et 2008/5/CE de la Commission et le règlement (CE) n° 608/2004 de la Commission Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, 2011. , OJ L.

Rehman Z. & Shah W.H., 2005. Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes. *Food Chem.* **91**(2), 327–331, DOI:10.1016/j.foodchem.2004.06.019.

Revellame E.D., Aguda R., Chistoserdov A., Fortela D.L., Hernandez R.A. & Zappi M.E., 2021. Microalgae cultivation for space exploration: Assessing the potential for a new generation of waste to human life-support system for long duration space travel and planetary human habitation. *Algal Res.* **55**, 102258, DOI:10.1016/j.algal.2021.102258.

Revy R., 2005. Levures biologiques alimentaires et poudres levantes. *Tech. Ing.* DOI:10.51257/a-v1-f4600.

Rioux V. & Legrand P., 2013. Matière grasse laitière et biodisponibilité des acides gras polyinsaturés. *Cent. Rech. Inf. Nutr.* (137).

Rivlin R., 2006. Riboflavin. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 250–9.

Sablani S.S., Marcotte M., Baik O.D. & Castaigne F., 1998. Modeling of Simultaneous Heat and Water Transport in the Baking Process. *LWT - Food Sci. Technol.* **31**(3), 201–209, DOI:10.1006/fstl.1997.0360.

Sachdeva N., Mascolo C., Wattiez R. & Leroy B., 2018. Embedding photosynthetic biorefineries with circular economies: Exploring the waste recycling potential of *Arthrospira* sp. to produce high quality by-products. *Bioresour. Technol.* **268**, 237–246, DOI:10.1016/j.biortech.2018.07.101.

Sacheck J.M. & Blumberg J.B., 2001. Role of vitamin E and oxidative stress in exercise. *Nutr. Burbank Los Angel. Cty. Calif* **17**(10), 809–814, DOI:10.1016/s0899-9007(01)00639-6.

Sahni S., Hannan M.T., Gagnon D., Blumberg J., Cupples L.A., Kiel D.P. & Tucker K.L., 2008. High Vitamin C Intake Is Associated with Lower 4-Year Bone Loss in Elderly Men,. *J. Nutr.* **138**(10), 1931–1938.

- Saif S.M.H., Lan Y. & Sweat V.E., 2003. Gelatinization Properties of Rice Flour. *Int. J. Food Prop.* **6**(3), 531–542, DOI:10.1081/JFP-120021457.
- Şakiyan Ö., Sumnu G., Sahin S., Meda V., Koksel H. & Chang P., 2011. A Study on Degree of Starch Gelatinization in Cakes Baked in Three Different Ovens. *Food Bioprocess Technol.* **4**, 1237–1244, DOI:10.1007/s11947-009-0210-2.
- Sakr M. & Liu S., 2014. A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renew. Sustain. Energy Rev.* **39**, 262–269, DOI:10.1016/j.rser.2014.07.061.
- Salazar-González C., San Martín-González M.F., López-Malo A. & Sosa-Morales M.E., 2012. Recent Studies Related to Microwave Processing of Fluid Foods. *Food Bioprocess Technol.* **5**(1), 31–46, DOI:10.1007/s11947-011-0639-y.
- Salengke, 2000. Electrothermal effects of OHMIC heating on biomaterials : temperature monitoring, heating of solid-liquid mixtures, and pretreatment effects on drying rate and oil uptake /.
- Samaranayake C. & Sastry S., 2005. Electrode and pH Effects on Electrochemical Reactions During Ohmic Heating. *J. Electroanal. Chem.* **577**, 125–135, DOI:10.1016/j.jelechem.2004.11.026.
- Samman S., Kung F.P., Carter L.M., Foster M.J., Ahmad Z.I., Phuyal J.L. & Petocz P., 2009. Fatty acid composition of certified organic, conventional and omega-3 eggs. *Food Chem.* **116**(4), 911–914, DOI:10.1016/j.foodchem.2009.03.046.
- Sandoval E.R., Otero-Guzmán N.C. & Tabares-Londoño J.A., 2020. Influence of different types of baking powder on quality properties of muffins. *DYNA* **87**(214), 9–16, DOI:10.15446/dyna.v87n214.83549.
- Sauer R., Janik D. & Thorstenson Y., 1987. *Medical effects of iodine disinfection products in spacecraft water*, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Schonberg Alexander. & Moubacher Radwan., 1952. The Strecker Degradation of α -Amino Acids. *Chem. Rev.* **50**(2), 261–277, DOI:10.1021/cr60156a002.
- Schuck P., 2011. Modifications des propriétés fonctionnelles des poudres de protéines laitières: Impact de la concentration et du séchage. *Innov. Agron.* **13**, 71–99.
- Schuck P., 2015. Modifications des propriétés fonctionnelles des poudres laitières : Impact de la concentration et du séchage. Presented at the Séminaire Nutrition Infantile, Spectralys Innovation, np.
- Schwenzfeier A., Wierenga P.A. & Gruppen H., 2011. Isolation and characterization of soluble protein from the green microalgae *Tetraselmis* sp. *Bioresour. Technol.* **102**(19), 9121–9127, DOI:10.1016/j.biortech.2011.07.046.
- Sellmeyer D.E., Schloetter M. & Sebastian A., 2002. Potassium citrate prevents increased urine calcium excretion and bone resorption induced by a high sodium chloride diet. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* **87**(5), 2008–2012, DOI:10.1210/jcem.87.5.8470.
- Selwitz C. & Maekawa S., 1999. *Inert Gases in the Control of Museum Insect Pests*, Getty Publications, 122.
- Sibonga J.D., 2013. Spaceflight-induced Bone Loss: Is there an Osteoporosis Risk? *Curr. Osteoporos. Rep.* **11**(2), 92–98, DOI:10.1007/s11914-013-0136-5.
- Siddiqui R., Akbar N. & Khan N. a., 2021. Gut microbiome and human health under the space environment. *J. Appl. Microbiol.* **130**(1), 14–24, DOI:10.1111/jam.14789.

- Silva Ferreira A.C., Monteiro J., Oliveira C. & Guedes de Pinho P., 2008. Study of major aromatic compounds in port wines from carotenoid degradation. *Food Chem.* **110**(1), 83–87, DOI:10.1016/j.foodchem.2008.01.069.
- Sirmons T.A., Roma P.G., Whitmire A.M., Smith S.M., Zwart S.R., Young M. & Douglas G.L., 2020. Meal replacement in isolated and confined mission environments: Consumption, acceptability, and implications for physical and behavioral health. *Physiol. Behav.* **219**, 112829, DOI:10.1016/j.physbeh.2020.112829.
- Smith S.M., 2009. *Nutritional Biochemistry of Space Flight*. Zwart, S.R., Kloeris, V., Heer, M. eds., New York: Nova Science Publishers, Inc., 208.
- Smith S.M., Davis-Street J.E., Rice B.L., Nillen J.L., Gillman P.L. & Block G., 2001. Nutritional status assessment in semiclosed environments: ground-based and space flight studies in humans. *J. Nutr.* **131**(7), 2053–2061, DOI:10.1093/jn/131.7.2053.
- Smith S.M., Heer M.A., Shackelford L.C., Sibonga J.D., Ploutz-Snyder L. & Zwart S.R., 2012. Benefits for bone from resistance exercise and nutrition in long-duration spaceflight: Evidence from biochemistry and densitometry. *J. Bone Miner. Res.* **27**(9), 1896–1906, DOI:10.1002/jbmr.1647.
- Smith S.M., Wastney M.E., O'Brien K.O., Morukov B.V., Larina I.M., Abrams S.A., Davis-Street J.E., Oganov V. & Shackelford L.C., 2005. Bone markers, calcium metabolism, and calcium kinetics during extended-duration space flight on the mir space station. *J. Bone Miner. Res. Off. J. Am. Soc. Bone Miner. Res.* **20**(2), 208–218, DOI:10.1359/JBMR.041105.
- Smith S.M. & Zwart S.R., 2015. Magnesium and Space Flight. *Nutrients* **7**(12), 10209–10222, DOI:10.3390/nu7125528.
- Smith S.M., Zwart S.R., Block G., Rice B.L. & Davis-Street J.E., 2005. The nutritional status of astronauts is altered after long-term space flight aboard the International Space Station. *J. Nutr.* **135**(3), 437–443, DOI:10.1093/jn/135.3.437.
- Sotiroudis T.G. & Sotiroudis G.T., 2013. Health aspects of Spirulina (Arthrospira) microalga food supplement. *J. Serbian Chem. Soc.* **78**(3), 395–405.
- Stabler S., 2006. Vitamin B12. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 302–13.
- Stein T.P., 2002. Space flight and oxidative stress. *Nutr. Burbank Los Angel. Cty. Calif* **18**(10), 867–871, DOI:10.1016/s0899-9007(02)00938-3.
- Steinke M., Malin G. & Liss P., 2002. Trophic interactions in the sea: An ecological role for climate relevant volatiles? *J. Phycol.* **38**, 630–638, DOI:10.1046/j.1529-8817.2002.02057.x.
- Steller J.G., Blue R., Zahner C., Frisch E.H., Bayuse T., Auñon-Chancellor S. & Jennings R.T., 2021. Menstrual management considerations in the space environment. *REACH* **23–24**, 100044, DOI:10.1016/j.reach.2021.100044.
- Stoecker B., 2006. Chromium. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 498–505.
- Suarez C., Viollaz P., Rovedo C.O., Tolaba M.P. & Haros C.M., 2000. Improved drying techniques and microwave food processing. *Minim. Process. Fruits Veg.* 175–188.
- Suedfeld P., 2003. Canadian space psychology: The future may be almost here. *Can. Psychol. Psychol.*

Can. **44**(2), 85–92, DOI:10.1037/h0086929.

Suffys S., Richard G., Burgeon C., Werrie P.-Y., Haubruge E., Fauconnier M.-L. & Goffin D., 2023. Characterization of Aroma Active Compound Production during Kombucha Fermentation: Towards the Control of Sensory Profiles. *Foods* **12**(8), 1657, DOI:10.3390/foods12081657.

Sun G.-S., Tou J.C., Yu D., Girtten B.E. & Cohen J., 2014. The past, present, and future of National Aeronautics and Space Administration spaceflight diet in support of microgravity rodent experiments. *Nutrition* **30**(2), 125–130, DOI:10.1016/j.nut.2013.04.005.

Sunde R., 2006. Selenium. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 480–97.

Švarc-Gajić J., Stojanović Z., Segura Carretero A., Arráez Román D., Borrás I. & Vasiljević I., 2013. Development of a microwave-assisted extraction for the analysis of phenolic compounds from *Rosmarinus officinalis*. *J. Food Eng.* **119**(3), 525–532, DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.06.030.

Szocik K., Abood S. & Shelhamer M., 2018. Psychological and biological challenges of the Mars mission viewed through the construct of the evolution of fundamental human needs. *Acta Astronaut.* **152**, 793–799, DOI:10.1016/j.actaastro.2018.10.008.

Takada Y., Kobayashi N., Kato K., Matsuyama H., Yahiro M. & Aoe S., 1997. Effects of whey protein on calcium and bone metabolism in ovariectomized rats. *J. Nutr. Sci. Vitaminol. (Tokyo)* **43**(2), 199–210, DOI:10.3177/jnsv.43.199.

Tang H., Rising H.H., Majji M. & Brown R.D., 2022. Long-Term Space Nutrition: A Scoping Review. *Nutrients* **14**(1), 194, DOI:10.3390/nu14010194.

Taylor A.J., Beauchamp J.D., Briand L., Heer M., Hummel T., Margot C., McGrane S., Pieters S., Pittia P. & Spence C., 2020. Factors affecting flavor perception in space: Does the spacecraft environment influence food intake by astronauts? *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **19**(6), 3439–3475, DOI:10.1111/1541-4337.12633.

Thomason S.J. & Bialkowski K.S., 2019. Dielectric Spectroscopy Based Determination of Sugar Content in Solution. *IEEE Sens. Lett.* **3**(5), 1–4, DOI:10.1109/LSENS.2019.2910832.

Thompson J., 2007. Vitamins, minerals and supplements: overview of vitamin C (5). *Community Pract. J. Community Pract. Health Visit. Assoc.* **80**(1), 35–36.

Tiefenbacher K.F., 2018. *The Technology of Wafers and Waffles II: Recipes, Product Development and Know-How*, London, United Kingdom ; San Diego, CA: Academic Press, 437.

Tietz N., Pruden E. & Siggaard-Andersen O., 1994. Electrolytes. In: *Tietz Textbook of Clinical Chemistry*. Philadelphia, PA: WB Saunders Company, 1887–973.

Traber M., 1999. Vitamin E. In: *Modern Nutrition in Health and Disease*. Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins, 347–62.

Ursu A.-V., Marcati A., Sayd T., Sante-Lhoutellier V., Djelveh G. & Michaud P., 2014. Extraction, fractionation and functional properties of proteins from the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresour. Technol.* **157**, 134–139, DOI:10.1016/j.biortech.2014.01.071.

Vadivambal R. & Jayas D.S., 2010. Non-uniform Temperature Distribution During Microwave Heating of Food Materials—A Review. *Food Bioprocess Technol.* **3**(2), 161–171, DOI:10.1007/s11947-008-0136-0.

- van Poppel G. & Goldbohm R.A., 1995. Epidemiologic evidence for beta-carotene and cancer prevention. *Am. J. Clin. Nutr.* **62**(6 Suppl), 1393S-1402S, DOI:10.1093/ajcn/62.6.1393S.
- Verbeelen T., Leys N., Ganigué R. & Mastroleo F., 2021. Development of Nitrogen Recycling Strategies for Bioregenerative Life Support Systems in Space. *Front. Microbiol.* **12**.
- Volpe S., 2006. Magnesium. In: *Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 400–408.
- von Loeffelholz C. & Birkenfeld A.L., 2000. Non-Exercise Activity Thermogenesis in Human Energy Homeostasis. In: Feingold, K.R., Anawalt, B., Boyce, A., Chrousos, G., de Herder, W.W., Dhatariya, K., Dungan, K., Hershman, J.M., Hofland, J., Kalra, S., Kaltsas, G., Koch, C., Kopp, P., Korbonits, M., Kovacs, C.S., Kuohung, W., Laferrère, B., Levy, M., McGee, E.A., McLachlan, R., Morley, J.E., New, M., Purnell, J., Sahay, R., Singer, F., Sperling, M.A., Stratakis, C.A., Trencé, D.L., Wilson, D.P. eds. *Endotext*. South Dartmouth (MA): MDText.com, Inc.
- Wahby I., 2016. *Biotechnologie des microalgues*.
- Watkins P., Hughes J., Gamage T.V., Knoerzer K., Ferlazzo M.L. & Banati R.B., 2022. Long term food stability for extended space missions: a review. *Life Sci. Space Res.* **32**, 79–95, DOI:10.1016/j.lssr.2021.12.003.
- Watson S., Brownlee B., Satchwill T. & Hargesheimer E., 2000. Quantitative Analysis of Trace Levels of Geosmin and MIB in Source and Drinking Water Using Headspace SPME. *Water Res.* **34**, 2818–2828, DOI:10.1016/S0043-1354(00)00027-0.
- Watters J.L., Satia J.A., Kupper L.L., Swenberg J.A., Schroeder J.C. & Switzer B.R., 2007. Associations of antioxidant nutrients and oxidative DNA damage in healthy African-American and White adults. *Cancer Epidemiol. Biomark. Prev. Publ. Am. Assoc. Cancer Res. Cosponsored Am. Soc. Prev. Oncol.* **16**(7), 1428–1436, DOI:10.1158/1055-9965.EPI-06-1030.
- Whedon G.D., Lutwak L., Rambaut P.C., Whittle M.W., Smith M.C., Reid J., Leach C.S., Stadler C.R. & Sanford D.D., 1977. Mineral and Nitrogen Metabolic Studies, Experiment M071. *Biomed. Results Skylab NASA Sp-377 Natl. Aeronaut. Space Adm.* 164–174.
- Whitson P.A., Pietrzyk R.A., Morukov B.V. & Sams C.F., 2001. The risk of renal stone formation during and after long duration space flight. *Nephron* **89**(3), 264–270, DOI:10.1159/000046083.
- Wilderjans E., Luyts A., Brijs K. & Delcour J.A., 2013. Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends Food Sci. Technol.* **30**(1), 6–15, DOI:10.1016/j.tifs.2013.01.001.
- Wrangham R. & Conklin-Brittain N., 2003. 'Cooking as a biological trait.' *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol.* **136**(1), 35–46, DOI:10.1016/S1095-6433(03)00020-5.
- Wu H., Kolbe E., Flugstad B., Park J.W. & Yongsawatdigul J., 1998. Electrical Properties of Fish Mince During Multi-frequency Ohmic Heating. *J. Food Sci.* **63**(6), 1028–1032, DOI:10.1111/j.1365-2621.1998.tb15847.x.
- Zeisel S.H., Mar M.-H., Howe J.C. & Holden J.M., 2003. Concentrations of choline-containing compounds and betaine in common foods. *J. Nutr.* **133**(5), 1302–1307, DOI:10.1093/jn/133.5.1302.
- Zerwekh J.E., 2002. Nutrition and renal stone disease in space. *Nutr. Burbank Los Angel. Cty. Calif* **18**(10), 857–863, DOI:10.1016/s0899-9007(02)00911-5.
- Zhang D., Clauwaert P., Luther A., López Barreiro D., Prins W., (Wim) Brilman D.W.F. & Ronsse F., 2018.

Sub- and supercritical water oxidation of anaerobic fermentation sludge for carbon and nitrogen recovery in a regenerative life support system. *Waste Manag.* **77**, 268–275, DOI:10.1016/j.wasman.2018.04.008.

Zhang D., Luther A.K., Clauwaert P. & Ronsse F., 2019. Mild temperature hydrothermal oxidation of anaerobic fermentation filtrate for carbon and nitrogen recovery in a regenerative life support system. *J. Supercrit. Fluids* **145**, 39–47, DOI:10.1016/j.supflu.2018.11.022.

ZHOU F., 2006. The Study on Dynamic Rheology of Rice Dough and the Technology of Rice Bread (Master's thesis).

Zimmermann M., 2006. Iodine and the iodine deficiency disorders. *In: Present Knowledge in Nutrition*. Washington D.C.: ILSI Press, 471–97.

Zittermann A., Heer M., Caillot-Augusso A., Rettberg P., Scheld K., Drummer C., Alexandre C., Horneck G., Vorobiev D. & Stehle P., 2000. Microgravity inhibits intestinal calcium absorption as shown by a stable strontium test. *Eur. J. Clin. Invest.* **30**(12), 1036–1043, DOI:10.1046/j.1365-2362.2000.00682.x.

Zwart S.R., Gibson C.R., Mader T.H., Ericson K., Ploutz-Snyder R., Heer M. & Smith S.M., 2012. Vision changes after spaceflight are related to alterations in folate- and vitamin B-12-dependent one-carbon metabolism. *J. Nutr.* **142**(3), 427–431, DOI:10.3945/jn.111.154245.

Zwart S.R., Pierson D., Mehta S., Gonda S. & Smith S.M., 2010. Capacity of omega-3 fatty acids or eicosapentaenoic acid to counteract weightlessness-induced bone loss by inhibiting NF-κB activation: From cells to bed rest to astronauts. *J. Bone Miner. Res.* **25**(5), 1049–1057, DOI:10.1359/jbmr.091041.

2. WEBOGRAPHIE

Titre – Explications | Auteur. Date. Site Web. Consulté le jour mois année, URL

1. ¹ L'alimentation dans la station spatiale internationale – Interview de Thomas Pesquet | Chaîne : Initiative.fr. 12/10/2017. YouTube. Consulté le 10 décembre 2022, https://www.youtube.com/watch?v=WJ36xkDhQn0&ab_channel=Initiatives.fr
2. ¹ FAQ – Foires aux questions sur le projet MELiSSA | N.D. MELiSSA FOUNDATION. Consulté le 31 décembre 2022, <https://www.melissafoundation.org/page/faq>
3. ¹ PHOTOBIOREACTOR – Explications du photobioreacteur du système MELiSSA | N.D. MELiSSA FOUNDATION. Consulté le 15/12/22, <https://www.melissafoundation.org/page/photobioreactor>
4. ¹ Thomas Pesquet en direct depuis l'ISS : "C'est de la science-fiction" – Article journalistique d'une interview de Thomas Pesquet | Benjamin Hue. 23/11/2016. RTL. Consulté le 4 janvier 2023, <https://www.rtl.fr/actu/sciences-tech/en-direct-suivez-la-premiere-conference-de-presse-de-thomas-pesquet-depuis-l-iss-7785937365>
5. ¹ 'Space makes eating a lot more fun!' Astronauts explain food prep – Explication de la cuisine de l'ISS par Jessica Meir et Andrew Morgan | Chaîne : VideoFromSpace. 16/04/2020. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, https://www.youtube.com/watch?v=onm7P_iFueE
6. ¹ Chris Hadfield's Space Kitchen – Explication de la cuisine de l'ISS par Chris Hadfield | Chaîne : Canadian Space Agency. 18/02/2013. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=AZx0RIV0wss>

7. ¹ Former NASA Astronaut Explains How Food Is Different in Space | WIRED – Explication de l'alimentation dans l'espace par Mike Massimino | Chaîne : WIRED. 16/07/2019. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=E36F4XG5zcY>
8. ¹ Cooking in space: whole red rice and turmeric chicken – Samantha Cristoforetti cuisine dans l'ISS | Chaîne : European Space Agency, ESA. 04/06/2015. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=4exaXdPKS3Y>
9. ¹ Thomas Pesquet fait visiter l'ISS avant son retour sur Terre – Visite de l'ISS par Thomas Pesquet | Chaîne : LeHuffPost. 06/11/2021. YouTube. Consulté le 26 décembre 2022, https://www.youtube.com/watch?v=gcmA0_CMFIU
10. ¹ Ice cream for ISS : Frozen dessert flying on station-bound SpaceX Dragon – Article d'actualité spatial | 6/10/2012. collectSPACE. Consulté le 30 décembre 2022, <http://www.collectspace.com/news/news-100612a.html>
11. ¹ Cyanobactéries et cyanotoxines dans l'eau potable et l'eau récréative– Définition et description des cyanobactéries | Pierre Chevalier et al. 29/04/19. Institut national de santé publique du Québec. Consulté le 3 janvier 2023, <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/cyanobacteries>
12. ¹ FAQ – Foires aux questions sur le projet MELISSA | N.D. MELISSA FOUNDATION. Consulté le 31 décembre 2022, <https://www.melissafoundation.org/page/faq>
13. ¹ MELISSA : de la recherche spatiale utile sur terre – Article de présentation du système MELISSA | 06/09/2016. ESA. Consulté le 13/12/2022, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Belgium_-_Francais/MELISSA_de_la_recherche_spatiale_utile_sur_la_Terre
14. ¹ Closed Loop Compartments – Explication des différents cycles du système MELISSA | N.D. ESA. Consulté le 31/12/22, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Melissa/Closed_Loop_Compartments
15. ¹ How to make pizza in space – Les astronautes réalisent des pizzas dans l'ISS | Chaîne : VideoFromSpace. 04/12/2017. YouTube. Consulté le 07 janvier 2023, <https://www.youtube.com/watch?v=GIQXm3lq3d0>
16. ¹ Gaufre (cuisine) – Page wikipedia de la gaufre | 08/07/2023. Wikipédia. Consulté le 14 août 2023, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaufre_\(cuisine\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaufre_(cuisine))
17. ¹ Gaufres faciles et légères – Recette de gaufres | N.D. Marmiton. Consulté le 14 août 2023, https://www.marmiton.org/recettes/recette_gaufres-faciles-et-legeres_87278.aspx
18. ¹ Compartment IV : The photoautotrophic compartment – Fonctionnement du compartiment CIV | N.D. ESA. Consulté le 8 janvier 2023, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Melissa/Compartment_IV_The_photoautotrophic_compartment
19. ¹ Sugars, brown – FoodData Central Search Results | 04/01/2019. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Consulté le 08 janvier 2023, <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/168833/nutrients>
20. ¹ La levure chimique – informations relative à la levure chimique | Laurent Lefebvre. N.D. Devenir pâtissier. Consulté le 28 juin 2023, <https://devenirpatissier.fr/la-levure-chimique/>
21. ¹ Fiche Technique Santé-Sécurité : Agents Pathogènes – Enterobacter spp. – Fiche technique | Agence de la santé publique du Canada. 19/04/2019. Gouvernement du Canada. Consulté le 23 juin 2023, <https://www.canada.ca/fr/sante-publique/services/biosecurite-biosurete/>

laboratoire/fiches-techniques-sante-securite-agents-pathogenes-evaluation-risques/enterobacter.html

22. ¹ ISO 18787:2017(fr) Produits agricoles et alimentaires — Détermination de l'activité de l'eau | 2017. ISO. Consulté le 08 janvier 2023, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18787:ed-1:v1:fr>
23. ¹ L'ESA : faits et chiffres – Qui fait partie de l'ESA ? | N.D. ESA. Consulté le 24 juin 2023, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/L_ESA_faits_et_chiffres
24. ¹ ATV-3 : LE RAVITAILLEMENT DE L'ISS MADE IN EUROPE – Un service de livraison express | Charlotte Beskow. 10/08/2011. Centre National d'Études Spatiales. Consulté le 30 juin 2023, <https://cnes.fr/fr/web/CNES-fr/9973-gp-atv-3-le-ravitaillement-de-l-iss-made-in-europe.php>
25. ¹ ISO 5492 :2008 – Analyse sensorielle - vocabulaire | 2022. ISO. Consulté le 13 août 2023, <https://www.iso.org/fr/standard/38051.html>
26. ¹ Liste des agences spatiales – liste des agences spatiales et les informations les concernant | 25/07/2022. Wikipédia. Consulté le 13 décembre 2022, https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_agences_spatiales
27. ¹ Space Food Systems – Présentation du laboratoire de recherche alimentaire de la NASA | Robert Lewis. 12/08/2022. NASA. Consulté le 13 décembre 2022, <https://www.nasa.gov/content/space-food-systems>
28. ¹ Les menus spatiaux vont se mitonner à Gembloux – Article journalistique sur le Smart Gastronomy Lab | Christian Du Brulle. 14/03/2022. Daily Science. Consulté le 13 décembre 2022, https://dailyscience.be/14/03/2022/les-menus-spatiaux-vont-se-mitonner-a-gembloux/?fbclid=IwAR34ajbPoYt6AauhX1xKW9ZHxzhhW9L5_4fUYUA3Mr5dXsbVITAWaD2G7hw
29. ¹ Ready for dinner on Mars? – Article de l'ESA Science & Exploration | 13/06/2005. ESA. Consulté le 13 décembre 2022, https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/Ready_for_dinner_on_Mars
30. ¹ Deep Space Food Challenge – Concours d'innovations alimentaire organisé par la NASA et la CSA | 2021. Deep Space Food Challenge. Consulté le 13/12/2022, <https://www.deepspacefoodchallenge.org/>
31. ¹ ESA-STAR registration process – procédure d'enregistrement des PME à l'ESA | 02/10/2020. ESA. Consulté le 14 décembre 2022, https://www.esa.int/About_Us/Business_with_ESA/How_to_do/esa-star_registration_process
32. ¹ Preparing a technical proposal – Article présentant les consignes pour proposer un projet | 17/10/2014. ESA. Consulté le 14 décembre 2022, https://www.esa.int/About_Us/Business_with_ESA/How_to_do/Preparing_a_technical_proposal
33. ¹ About Directorate Technology Programmes – Informations sur les différents programmes de financement de projet de l'ESA | N.D. ESA. Consulté le 14 décembre 2022, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/About_Directorate_Technology_Programmes
34. ¹ MECA ZÉRO – COURS & INFOS SUR LA MÉCANIQUE – Pied à coulisse | 28/12/2016. Meca0. Consulté le 8 août 2016, <https://meca0.wordpress.com/2016/12/28/pied-a-coulisse/>
35. ¹ The Good Scents Company Information System – informations pour les industries sensorielles, de la parfumerie, de l'alimentaire et des Cosmétiques | 1980-2021. The Good Scents Company. Consulté le 10 août 2023, <http://www.thegoodscentscompany.com/>

36. ¹ Vieillessement Accéléré – explications du vieillissement accéléré | N.D. Celabor. Consulté le 16 août 2023, https://www.celabor.be/site/5_vieillessement-accelere/index.html
37. ¹ Sachet autoclave – Article d'encyclopédie en ligne | 22/08/2022. Wikipedia. Consulté le 15 janvier 2023, https://fr.wikipedia.org/wiki/Sachet_autoclave
38. ¹ What is a retort pouch – Questions-réponses de l'USDA | 10/11/2022. U.S. Department of Agriculture. Consulté le 15 janvier 2023, <https://ask.usda.gov/s/article/What-is-a-retort-pouch#:~:text=A%20retort%20pouch%20is%20commonly,%2C%20aluminum%20foil%2C%20and%20polypropylene.>
39. ¹ Layers In A Retort Pouches For Ready-To-Serve Products – Explication d'une poche autoclave | Expert en packaging. Date. LOGOS. Consulté le 15 janvier 2023, <https://www.logospack.com.hk/layers-in-a-retort-pouches-for-ready-to-serve-products/>
40. ¹ Infographic: Unlock your brand's potential with recyclable retort packaging – article sur la poche autoclave d'AMCOR | 24/06/2022. AMCOR. Consulté le 15 janvier 2023, <https://www.amcor.com/insights/educational-resources/recycle-ready-retort-packaging>
41. ¹ Valve anti-reflux – Matériel médical | N.D. Avantor delivered by VWR. Consulté le 16 août 2023, <https://be.vwr.com/store/product/fr/578218/valve-anti-retour>
42. ¹ LES SELS MINÉRAUX ET LES OLIGOÉLÉMENTS – résumé des sels minéraux et oligoéléments | 16/09/2019. VIDAL Consulté le 30 décembre 2022, <https://www.vidal.fr/sante/nutrition/corps-aliments/sels-mineraux-oligoelements.html>
43. ¹ Que sont les vitamines ? – Présentation des vitamines | 15/12/2012. Anses. Consulté le 30 décembre 2022, <https://www.anses.fr/fr/content/que-sont-les-vitamines>
44. ¹ Farine de riz – Table ciquale de la composition nutritionnelle des aliments | N.D. ANSES. Consulté le 8 janvier 2023, <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/9520/farine-de-riz>
45. ¹ Lait en poudre, entier – Table ciquale de la composition nutritionnelle des aliments | N.D. ANSES. Consulté le 2 janvier 2023, <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/19021/lait-en-poudre-entier>

ANNEXES
LISTE DES ANNEXES

BESOINS EN MINÉRAUX ET OLIGO-ÉLÉMENTS

Les minéraux sont essentiels au bon fonctionnement du corps humain et sont nécessaires à de nombreuses fonctions vitales, telles que la croissance, la reproduction et le maintien de la santé osseuse. Les oligo-éléments sont des minéraux nécessaires en très petite quantité, mais sont tout autant essentiels.⁴²

CALCIUM

L'os est le réservoir de calcium du corps, la brique qui structure et rigidifie l'os ; il intervient également dans le processus de remodelage osseux. Le calcium est l'un des micronutriments les plus étudiés chez les astronautes, uniquement en raison de sa relation avec la perte osseuse observée durant les vols spatiaux. Celle-ci est généralement due à l'adaptation à l'apesanteur, une alimentation inadéquate, des activités physiques réduites, aux perturbations du métabolisme des minéraux. (Sibonga, 2013).

Pour mener des missions spatiales en toute sécurité, les effets de la microgravité sur le système squelettique humain doivent être évalués. Ainsi, des études du bilan calcique ont été effectuées au cours des missions Skylab et Mir de longue durée (Leach et al., 1977; Whedon et al., 1977; Zittermann et al., 2000; Smith, Wastney, et al., 2005). Ces études ont montré que l'absence de gravité peut entraîner une perte de minéraux osseux dans le corps, ce qui peut augmenter l'excrétion urinaire et fécale de calcium et augmenter le risque de calculs rénaux. Selon certaines estimations, cette perte de minéraux osseux peut atteindre jusqu'à 1% par mois pendant un vol spatial. Une étude de Hackney et al. (2015) a également mentionné que cette perte osseuse peut provoquer une ostéoporose et même une paralysie dans les cas graves.

Des moyens physiques, médicaux et nutritionnels ont été utilisés pour contrer ces changements. En 2012, Dans une étude sur les vols spatiaux, il a été démontré qu'un exercice de résistance intense et un bon statut nutritionnel en protéine et en vitamine D, K et C permettaient de réduire la perte de densité minérale osseuse chez les astronautes lors de missions de longue durée dans la Station spatiale internationale (Smith et al., 2012; Sibonga, 2013). Les recommandations pour le calcium sont de 1000-1200 mg par jour (Smith, 2009)

PHOSPHORE

Le phosphore est essentiel pour la structure et la fonction des membranes cellulaires et du tissu osseux. En effet, on estime que 85% du phosphore présent dans l'organisme humain est localisé dans les os et les dents (Anderson et al., 2006). Cependant, il a été démontré qu'un apport excessif en phosphore entre en compétition avec l'absorption du calcium ce qui a pour effet d'augmenter l'excrétion du calcium endogène dans les fèces (Davies et al., 2004).

Les résultats des analyses biomédicales des membres de l'équipage de Skylab pendant le vol ont montré une augmentation des concentrations des phosphates plasmatiques (Leach et al., 1977).

Ainsi, l'apport recommandée pour les vols spatiaux concernant la teneur alimentaire en phosphore est de 700 mg/j, et il ne doit pas dépasser 1,5 fois l'apport en calcium (NASA JSC, 2005).

MAGNÉSIUM

⁴² LES SELS MINÉRAUX ET LES OLIGOÉLÉMENTS – résumé des sels minéraux et oligoéléments | 16/09/2019. VIDAL Consulté le 30 décembre 2022, <https://www.vidal.fr/sante/nutrition/corps-aliments/sels-mineraux-oligoelements.html>

Le magnésium est un minéral essentiel au bon fonctionnement de l'organisme. Il est nécessaire comme cofacteur pour plus de 300 réactions métaboliques dans le corps et sert de substrat pour les réactions de transfert de phosphate dans toutes les cellules (Volpe, 2006).

Plusieurs études ont constaté que le métabolisme du magnésium a été modifié pendant et après un vol spatial de longue durée (4- 6 mois) et le magnésium urinaire est inférieur d'environ 45 % à ce qu'il était avant le vol (Leach et al., 1977; Leach, 1992; Smith et al., 2015).

Les besoins documentés pour l'apport alimentaire en magnésium pendant un vol spatial est de 420 et 320 mg/j pour les hommes et les femmes respectivement (NASA JSC, 2005).

SODIUM

Le sodium est le principal cation du liquide extracellulaire (Oh et al., 1999) Il permet de maintenir la distribution normale de l'eau, la pression osmotique et contribue au bon fonctionnement des muscles et des nerfs (Tietz et al., 1994).

En revanche, Le sodium alimentaire est également connu pour affecter l'homéostasie du calcium (Arnaud et al., 2000; Ho et al., 2001; Heer, 2002). De ce fait, il présente une préoccupation pendant les vols spatiaux, car les régimes spatiaux ont tendance à contenir des quantités relativement élevées de sodium et par conséquent, une augmentation de la quantité de calcium dans l'urine qui peut être liée au risque accru de calculs rénaux (Blackwood et al., 2001; Sellmeyer et al., 2002). Ces données sont confirmées par Whitson et al. (2001) et Zerwekh. (2002) qui ont montré une augmentation du risque de calculs rénaux pendant et après le vol spatial.

La recommandation pour un apport adéquat en sodium pour les vols spatiaux est de 1500 à 2300 mg/j (NASA JSC, 2005).

CHLORE

Le chlore est un élément chimique qui a pour rôle de maintenir l'osmolarité et le volume des liquides extracellulaires, ainsi que de participer à la régulation de l'équilibre acido-basique et à la production d'acide gastrique. Ces pertes peuvent survenir principalement par la sueur. Il est recommandé d'apporter une quantité adéquate de chlore compris entre 2,3 et 2,0 g par jour pour un adulte (EFSA, 2005; IOM, 2005).

POTASSIUM

Le potassium est le principal cation intracellulaire, il joue un rôle important dans plusieurs processus physiologiques (Preuss, 2001). Il est crucial à la régulation de l'équilibre acido-basique, du métabolisme énergétique, de la pression sanguine, du transport membranaire et de la distribution des fluides dans l'organisme (Kleinman et al., 1984).

Selon rapport médical de Leach et al. (1975), Les taux sériques et urinaires de potassium ont été diminués après un vol spatial sur Apollo. Ces données sont conformes au rapport de Leach et rambaut (1977) qui a trouvé des résultats similaires sur Skylab. Ainsi, la recommandation d'un apport adéquat en potassium pour les vols spatiaux est de 4 700 mg/j (NASA JSC, 2005).

FER

Le fer est un élément essentiel qui joue un rôle majeur en tant que constituant de l'hémoglobine, une protéine des globules rouges, en charge du transport de l'oxygène, la phosphorylation oxydative dans les glucides et des lipides et de la fonction immunitaire (Beard, 2006).

Une diminution de masse de globules rouges a été observée au cours des 10 à 14 premiers jours du vol spatial qui entraîne une augmentation de la ferritine sérique et une diminution des récepteurs de la transferrine, ce qui explique une augmentation du stockage du fer (Alfrey et al., 1996, 1997; Smith, Wastney, et al., 2005). L'apport alimentaire recommandé en fer pendant les missions spatiales est de 8 à 10 mg/jour (NASA JSC, 2005). En cas de menstruations, les recommandations augmentent de 5 mg (CSS, 2016; Steller et al., 2021)

ZINC

Le zinc est un composant de nombreuses enzymes, qui en dépendent pour leur activité catalytique (Cousins, 2006). Il est impliqué dans la stimulation des défenses immunitaires, la protection contre le vieillissement cellulaire, l'intégrité de la peau et le métabolisme osseux, étant nécessaire à la formation osseuse et à l'activité de la phosphatase alcaline, ainsi qu'à la synthèse du collagène (Palacios, 2006). L'apport documenté des vols spatiaux en matière d'apport alimentaire en zinc est de 11 mg/j (NASA JSC, 2005). ex

CUIVRE

Le cuivre est un cofacteur essentiel au bon fonctionnement du système nerveux et du système immunitaire (Prohaska, 2006), en outre, il est impliqué dans la santé osseuse (Palacios, 2006).

Les besoins documentés des vols spatiaux en matière d'apport alimentaire en cuivre sont de 0,5 à 9 mg/j (NASA JSC, 2005).

SÉLÉNIUM

Le sélénium est un oligoélément essentiel à l'organisme, il est très connu pour ses propriétés antioxydantes. Il joue également un rôle dans le maintien ou l'induction du cytochrome P450, la fonction pancréatique, la réparation de l'ADN, l'activation des enzymes et la fonction du système immunitaire (Sunde, 2006).

Selon l'étude de Smith, Zwart et al. (2005), les concentrations sériques de sélénium ont été diminuées significativement (10%) chez les astronautes après un vol spatial. Ainsi, Les besoins recommandés pour l'apport alimentaire en sélénium pendant les vols spatiaux sont de 70 µg/j (NASA JSC, 2005).

IODE

L'iode est un oligo-élément essentiel pour le fonctionnement de la glande thyroïde et par conséquent il est indispensable à la synthèse des hormones thyroïdiennes qui jouent un rôle fondamental dans l'intégrité de la peau, la croissance, le maintien de la température corporelle, la fertilité et la digestion (Zimmermann, 2006).

Sauer et al. (McMonigal et al., 2000, 2002) ont montré que l'apport en iode lors des missions de la navette a été très élevé par la raison de l'utilisation de l'iode comme agent bactéricide dans le système d'eau. Ainsi des changements de l'état de la thyroïde ont été observés chez les astronautes en relation avec l'excès en iode (NASA JSC, 2005). Par conséquent, un système permettant de retirer l'iode de l'eau a été mis à la fin des années 1990. L'apport en iode documenté pendant les vols spatiaux est de 150 µg/j (Groff et al., 2000).

MANGANÈSE

Le manganèse est un nutriment essentiel à la formation des os. Il fonctionne en tant qu'activateur d'enzymes et en tant que composant de métabolisme des acides aminés, des glucides et du cholestérol (1979).

Une étude russe de Prokhonchukov et al (NASA JSC, 2005) a montré que la teneur en manganèse des os est plus élevée (26-187 %) après le vol spatial. Ainsi, un apport alimentaire en manganèse a été fixé pour les vols spatiaux, de 2,3 mg/j pour les hommes et 1,8 mg/j pour les femmes (Stoecker, 2006).

CHROME

Le chrome est un oligo-élément, intervient dans le métabolisme des macronutriments (glucides, lipides, protéines) et également contribue au maintien d'une glycémie normale par la régulation de la sécrétion de l'insuline pancréatique (NASA JSC, 2005).

Les besoins documentés en matière d'apport alimentaire en chrome, pendant les vols spatiaux, sont de 35 µg/j (IOF US et al., 1997).

FLUOR

Le fluor est un oligo-élément essentiel, on le retrouve dans l'organisme au niveau des dents et des os, il influe sur la fonction des ostéoblastes, permettant ainsi la fabrication d'os nouveau (NASA JSC, 2005). L'exigence documentée pour les vols spatiaux en matière d'apport alimentaire en fluorure est de 3 et 4 mg/j pour les femmes et les hommes respectivement (Olson, 1994).

BESOINS EN VITAMINES

Les vitamines sont des substances organiques essentielles qui sont nécessaires à au corps humain en très petites quantités pour maintenir la santé et le bon fonctionnement. Elles jouent un rôle important dans de nombreuses réactions chimiques du corps et sont impliquées dans de nombreuses fonctions vitales.⁴³

⁴³ Que sont les vitamines ? – Présentation des vitamines | 15/12/2012. Anses. Consulté le 30 décembre 2022, <https://www.anses.fr/fr/content/que-sont-les-vitamines>

VITAMINE A ET CAROTÉNOÏDES À ACTIVITÉ PROVITAMINIQUE A

La vitamine A et les caroténoïdes de provitamine A dont le β -carotène servent d'antioxydants biologiques. La vitamine A joue un rôle majeur dans diverses fonctions de l'organisme, elle est directement impliquée dans la vision, l'expression génétique, la reproduction, le développement embryonnaire et l'immunité, et elle a un impact direct ou indirect sur la fonction de presque tous les organes du corps (Kohlmeier et al., 1995; van Poppel et al., 1995). En outre, des nombreuses études ont montré qu'elle a réduit le risque de cancer et de maladies coronariennes (Tietz et al., 1994).

Les changements dans la vision des astronautes sont un problème récemment reconnu. Selon l'étude de la NASA sur la cataracte chez les astronautes, Les données obtenues ont apporté la preuve que l'apport de β -carotène avait un effet protecteur pour certains types de cataractes chez les astronautes (2012). En supplément de Zwart et al. (2005) qui ont également indiqué que des exercices de résistance associés à un régime alimentaire riche en vitamine B12, de folate, d'antioxydants et de vitamine A pourraient aider à lutter contre ces problèmes. Et donc, l'inclusion d'aliments ayant des propriétés fonctionnelles et d'aliments enrichis en vitamine A et B12 peut aider à améliorer les problèmes de vision dans l'espace tel que la citrouille, le chou frisé, le bœuf, la carotte, les épinards et la laitue...

Par ailleurs, Jackson et Sheehan (2005) ont montré que le stress oxydatif augmente pendant les vols spatiaux, ce qui pourrait affecter la santé cardiovasculaire et le risque de cancer. Le statut en vitamine A peut jouer également un rôle essentiel dans le maintien de la santé antioxydante pendant le vol spatial. Ainsi, L'apport nutritionnel recommandé en vitamine A des vols spatiaux est de 700 à 900 $\mu\text{g}/\text{j}$.

VITAMINE D

La vitamine D joue un rôle essentiel dans le métabolisme du calcium. L'une des principales fonctions de cette vitamine est de maintenir des taux sanguins normaux de calcium et de la santé des os dans l'organisme. Les personnes qui sont normalement exposées à la lumière du soleil produisent de la vitamine D dans leur peau (Figure 77). La lumière ultraviolette B, un composant de la lumière solaire, convertit le 7-déhydrocholestérol en 25-hydroxyvitamine D₃ dans la peau (2009). Mais les vaisseaux spatiaux tels protègent l'équipage des rayonnements nocifs et donc les astronautes ne peuvent pas obtenir cette vitamine du soleil. Par conséquent, leur alimentation doit inclure une bonne quantité de vitamine D afin d'aider à prévenir la perte osseuse.

D'après Smith SM et al. (2009) Il est recommandé aux membres de l'équipage de l'ISS de prendre 800 UI/jour de vitamine D pendant les vols spatiaux de longue durée.

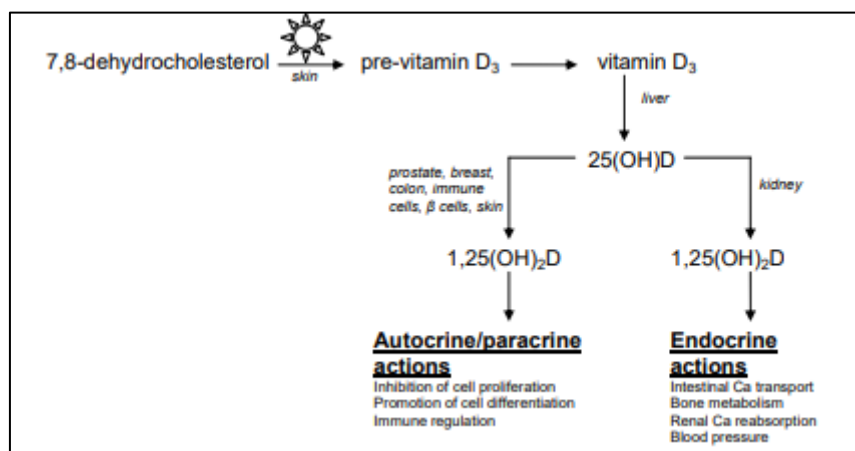


Figure 77 : Synthèse, activation et catabolisme de la vitamine D (Sacheck et al., 2001)

VITAMINE E

La vitamine E est un antioxydant liposoluble, qui joue le rôle de défense contre les réactions de peroxydation des lipides (Traber, 1999). La vitamine E recouvre un ensemble de 8 molécules qui peuvent être regroupées en deux classes distinctes : les tocophérols et les tocotriénols dont la première est la plus abondante dans les systèmes biologiques (Institute of Medicine, 2000). Une carence en vitamine E entraîne des troubles neurologiques, une anémie hémolytique, une rétinopathie, des anomalies des plaquettes et des lymphocytes, voire la mort (Fang et al., 2002; Stein, 2002)

Le stress oxydatif peut augmenter dans les environnements de microgravité (Pence et al., 2000), il est donc nécessaire de fournir suffisamment de vitamine E pour que les taux sanguins de vitamine E chez les astronautes soient plus élevés pendant les vols spatiaux. Les propriétés antioxydantes de cette vitamine contribuent à la réduction des dommages liées aux radicaux libres causés par les rayonnements. En revanche, un prétraitement avec des antioxydants peut aider à réduire les dommages causés par les radiations pendant les missions (NASA JSC, 2005). Il est recommandé de consommer 15 mg par jour de vitamine E (Olson, 1984).

VITAMINE K

Les vitamines K forment un groupe de vitamines liposolubles. Elles sont essentielles à la coagulation du sang et au métabolisme des os et d'autres tissus (Smith, Zwart, et al., 2005).

Une étude américaine sur des 11 astronautes lors des vols spatiaux à longue durée, a révélé que le jour de l'atterrissage, leur vitamine K1 était inférieure de 42 % à ce qu'elle était avant le vol (NASA JSC, 2005). Par conséquent des besoins sont recommandés pour les vols spatiaux en matière d'apport alimentaire en vitamine K de 90 et 120 µg par jour pour les femmes et les hommes, respectivement (Johnson, 2006).

VITAMINE C

La vitamine C est une vitamine hydrosoluble. Elle contribue au bon fonctionnement du système immunitaire et participe aux défenses antioxydantes de l'organisme. La vitamine C assure une protection antioxydante en ramenant l'α-tocophérol à son état biologiquement actif lors de l'oxydation des lipides (2007).

Selon les études de Thompson (2007) et Watters et al. (2008), La vitamine C a été associée à la trouble de la vision et à l'incidence du cancer chez les astronautes. Alors qu'une autre étude de Sahni et al. (NASA JSC, 2005) a prouvé qu'un apport élevé en vitamine C et en potassium engendre la réduction de la perte osseuse.

Les besoins documentés pour les vols spatiaux en matière d'apport alimentaire en vitamine C sont de 90 mg/j (Bates, 2006).

THIAMINE

La thiamine est un précurseur métabolique de la thiamine pyrophosphate, Elle fonctionne comme une coenzyme dans le métabolisme des glucides, des lipides, et des acides aminés et est spécifiquement impliqué dans le fonctionnement des cellules nerveuses centrales et périphériques et du myocarde (Caballero et al., 2005; Smith, Zwart, et al., 2005).

En effet, des évaluations de l'activité transcétole érythrocytaire, un indicateur du statut en thiamine, ont été effectuées avant et après les vols spatiaux, les résultats obtenus n'ont pas illustré de données anormales (NASA JSC, 2005).

Les besoins documentés en matière d'apport alimentaire en thiamine pendant les vols spatiaux sont de 1,2 pour les hommes et 1,1 mg/j pour les femmes (Rivlin, 2006).

RIBOFLAVINE

La riboflavine est hydrosoluble et est caractérisée par son rôle principal dans l'organisme la dégradation des éléments de l'alimentation (Powers, 2003). Cette dégradation aboutit à la production des produits utilisables pour le fonctionnement cellulaire, dont les folates, la vitamine B12 et la vitamine B6 (Powers, 2003; Rivlin, 2006). La riboflavine participe également à une série de réactions d'oxydoréduction dans de nombreuses voies métaboliques (2005). Après un vol à bord de la station spatiale internationale, Smith et al. (NASA JSC, 2005) ont effectué un test sur l'activation de la glutathion réductase des érythrocytes afin d'évaluer l'état nutritionnel de la riboflavine, les données obtenues ont montré qu'il n'y a pas des changements significatifs par rapport aux valeurs obtenues avant le vol.

L'apport alimentaire conseillé en riboflavine pendant les vols spatiaux est de 1,3 mg/j (Jacob, 2006).

NIACINE

La niacine est une vitamine hydrosoluble appelée aussi vitamine B3. Ce dernier joue de nombreux rôles métaboliques dans le corps humain, sous ses formes coenzymes, le nicotinamide adénine dinucléotide (NAD) et le nicotinamide adénine dinucléotide phosphate (NADP). Elles participent à la production d'énergie au sein des cellules, à la synthèse des acides gras, du cholestérol, à la réparation de l'ADN et intervient dans le fonctionnement du système nerveux (NASA JSC, 2005).

L'apport nutritionnel conseillé des vols spatiaux en matière d'apport alimentaire en niacine sont de 16 mg d'équivalents niacine/j (EN/J) (Miller et al., 2006).

ACIDE PANTOTHENIQUE

L'acide pantothénique correspondant à la vitamine B5, est une vitamine hydrosoluble qui joue le rôle d'un précurseur métabolique de la coenzyme A, nécessaire à la synthèse et au métabolisme des lipides, des glucides et des protéines (NASA JSC, 2005).

Chez les astronautes, l'exigence recommandée pour l'apport alimentaire en acide pantothénique pendant un vol spatial est de 30 mg/j (Groff et al., 2000).

PYRIDOXINE

La pyridoxine est une des formes de la vitamine B6. Cette vitamine intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (2005).

Dans le but d'évaluer le statut en vitamine B6, Smith et al. (NASA JSC, 2005) ont fait une étude sur les astronautes qui ont effectué des vols spatiaux de 4 à 6 mois. Aucun changement n'a été observé dans l'activation de la transaminase des globules rouges.

Un apport nutritionnel en vitamine B6 a été déterminé de 1,7 mg/j (Camporeale et al., 2006).

BIOTINE

La biotine, appelée aussi vitamine B8, est une coenzyme qui participe au métabolisme des glucides, des acides gras et des acides aminés, ainsi qu'à la biosynthèse des vitamines B9 et B12 (NASA JSC, 2005).

L'exigence documentée pour l'apport alimentaire de biotine pendant les vols spatiaux est de 30 µg/j (Bailey et al., 2006)

ACIDE FOLIQUE

L'acide folique (également appelé folates ou vitamine B₉) est le précurseur métabolique d'une coenzyme, le tétrahydrofolate, impliquée notamment dans la synthèse des bases nucléiques, purines et pyrimidines, constituant les acides nucléiques du matériel génétique (Smith et al., 2001; Smith, Zwart, et al., 2005).

Des études effectuées sur des astronautes, ont montré que l'acide folique est diminué après un vol spatial de 4 à 6 mois (NASA JSC, 2005).

Les besoins nutritionnels nécessaires au cours d'un vol spatial en matière d'apport en acide folique sont de 400 µg/j (Stabler, 2006).

VITAMIN B12

La vitamine B12 est une vitamine hydrosoluble essentielle au fonctionnement de nombreuses réactions enzymatiques. Elle participe également à la formation normale de globules rouges, ainsi qu'au fonctionnement du système immunitaire (NASA JSC, 2005).

Les besoins recommandés des vols spatiaux en matière d'apport alimentaire en vitamine B12 sont de 2,4 µg/J (Pincemail, 2014).

BESOINS EN ANTIOXYDANTS

Les antioxydants sont une famille de substances qui comprend des vitamines (C et E), des micronutriments (caroténoïdes, polyphénols...), des sels minéraux (sélénium...), des enzymes et des protéines (glutathion, coenzyme Q10...). Leur rôle est de protéger l'organisme contre les altérations causées par les radicaux libres en réduisant ou en empêchant l'oxydation de molécules chimiques. Les radicaux libres sont des espèces réactives de l'oxygène produites lors de l'utilisation normale de l'oxygène par l'organisme, qui peuvent causer des dommages aux cellules et aux tissus. Les antioxydants interviennent en neutralisant ces radicaux libres avant qu'ils n'aient le temps de causer des dommages (Brocca et al., 2012).

La perte musculaire induite par la diminution de l'activité physique et des contraintes sur le corps augmente l'inflammation corporelle et diminue la quantité de protéines sanguines ayant un rôle antioxydant (Fang et al., 2002) ; les différentes radiations (solaire, cosmique et ceinture de Van Allen) provoquent également des réactions d'oxydations dans le corps. Il est donc recommandé de consommer des antioxydants pour limiter l'impact des espèces oxygénées activées sur le corps (Pincemail, 2014).

Il n'y a pas de recommandations quantitatives en antioxydants de manière générale, cependant ils sont importants et leur consommation raisonnée est bénéfique pour la santé. Il est important d'avoir une activité physique régulière, consommer des fruits et légumes colorés ainsi qu'avoir une hygiène de vie adéquate (Pincemail, 2014).

ANNEXE II. COMPOSITIONS NUTRITIONNELS DES MATIÈRES PREMIÈRES

FARINE DE RIZ

Tableau 44 : composition nutritionnelle de la farine de riz (source : Ciqual, ANSES)⁴⁴

Nom	Teneur moyenne
Energie (kJ/100 g)	1510
Eau (g/100 g)	11,4
Protéines (g/100 g)	7,62
Glucides (g/100 g)	73,9
Lipides (g/100 g)	2,5
Sucres (g/100 g)	0,9
Amidon (g/100 g)	70
Fibres alimentaires (g/100 g)	3,3
Cendres (g/100 g)	1,27
AG saturés (g/100 g)	0,46
AG monoinsaturés (g/100 g)	0,97
AG polyinsaturés (g/100 g)	0,92
Sel chlorure de sodium (g/100 g)	< 0,13
Calcium (mg/100 g)	9,5
Chlorure (mg/100 g)	29,2
Cuivre (mg/100 g)	0,18
Fer (mg/100 g)	0,79
Iode (µg/100 g)	< 20
Magnésium (mg/100 g)	110
Manganèse (mg/100 g)	2,3
Phosphore (mg/100 g)	300
Potassium (mg/100 g)	270
Sélénium (µg/100 g)	< 20
Sodium (mg/100 g)	< 5
Zinc (mg/100 g)	1,4
Rétinol (µg/100 g)	0
Beta-Carotène (µg/100 g)	0
Vitamine D (µg/100 g)	< 0,25
Vitamine E (mg/100 g)	0,66
Vitamine K1 (µg/100 g)	1,78
Vitamine C (mg/100 g)	< 0,5
Thiamine (mg/100 g)	0,33
Riboflavine (mg/100 g)	< 0,01
Niacine (mg/100 g)	< 0,1
Acide pantothénique (mg/100 g)	0,97
Vitamine B6 (mg/100 g)	0,13
Folates totaux (µg/100 g)	25,1
Vitamine B12 (µg/100 g)	0

⁴⁴ Farine de riz – Table ciqual de la composition nutritionnelle des aliments | N.D. ANSES. Consulté le 8 janvier 2023, <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/9520/farine-de-riz>

Tableau 45 : composition nutritionnelle de la farine de blé (source : Ciqual, ANSES)

Constituant	Teneur moyenne
Energie, Règlement UE N° 1169/2011 (kJ/100 g)	1510
Eau (g/100 g)	11,3
Protéines (g/100 g)	9,06
Glucides (g/100 g)	75,9
Lipides (g/100 g)	0,82
Sucres (g/100 g)	0,41
Amidon (g/100 g)	69,3
Fibres alimentaires (g/100 g)	2,5
Cendres (g/100 g)	0,48
AG saturés (g/100 g)	0,13
AG monoinsaturés (g/100 g)	0,084
AG polyinsaturés (g/100 g)	0,33
Sel chlorure de sodium (g/100 g)	0,098
Calcium (mg/100 g)	17,4
Chlorure (mg/100 g)	61
Cuivre (mg/100 g)	0,13
Fer (mg/100 g)	1,18
Iode (µg/100 g)	< 5
Magnésium (mg/100 g)	25
Manganèse (mg/100 g)	0,51
Phosphore (mg/100 g)	117
Potassium (mg/100 g)	155
Sélénium (µg/100 g)	2,76
Sodium (mg/100 g)	39
Zinc (mg/100 g)	0,76
Rétinol (µg/100 g)	0
Vitamine D (µg/100 g)	0
Vitamine E (mg/100 g)	0,43
Vitamine K1 (µg/100 g)	0
Vitamine C (mg/100 g)	0
Vitamine B1 ou Thiamine (mg/100 g)	0,12
Vitamine B2 ou Riboflavine (mg/100 g)	0,031
Vitamine B3 ou PP ou Niacine (mg/100 g)	0,89
Vitamine B5 ou Acide pantothénique (mg/100 g)	0,84
Vitamine B6 (mg/100 g)	0,06
Vitamine B9 ou Folates totaux (µg/100 g)	18
Vitamine B12 (µg/100 g)	0

Farine de blé – Table ciqual de la composition nutritionnelle des aliments | N.D. ANSES. Consulté le 8 janvier 2023, [https://ciqual.anses.fr/#/aliments/9440/farine-de-ble-tendre-ou-froment-t45-\(pour-patisserie\)](https://ciqual.anses.fr/#/aliments/9440/farine-de-ble-tendre-ou-froment-t45-(pour-patisserie))

Tableau 46 : composition nutritionnelle du sucre brun (Takahashi et al., 2016)

Nutriment	Quantité	Nutriment	Quantité
Glucides	87.07 ± 2.62 g	Phosphore	37.39 ± 2.33 mg
Glucose	2.74 ± 0.46 g	Sodium	18.18 ± 1.29 mg

Fructose	1.77 ± 0.45 g	Fer	0.91 ± 0.14 mg
Saccharose	82.56 ± 3.50 g	Aluminium	1.03 ± 0.13 mg
Potassium	755.50 ± 50.51 mg	Zinc	1.58 ± 0.37 mg
Calcium	103.37 ± 4.38 mg	Manganèse	0.20 ± 0.04 mg
Magnésium	81.57 ± 3.14 mg	Cuivre	1.43 ± 0.09 mg

Tableau 47 : Informations nutritionnelles de la poudre de lait entier (Source : CIQUAL)⁴⁵

Informations nutritionnelles	
Nom	Teneur
Energie (kcal/100 g)	499
Eau (g/100 g)	2,4
Protéines (g/100 g)	26,9
Glucides (g/100 g)	37,5
Lipides (g/100 g)	26,8
Sucres (g/100 g)	37,5
Lactose (g/100 g)	37,5
AG saturés (g/100 g)	17,3
AG monoinsaturés (g/100 g)	7,22
AG polyinsaturés (g/100 g)	0,76
Cholestérol (mg/100 g)	107
Sel chlorure de sodium (g/100 g)	0,9
Calcium (mg/100 g)	960
Chlorure (mg/100 g)	886
Cuivre (mg/100 g)	0,058
Fer (mg/100 g)	0,62
Iode (µg/100 g)	7
Magnésium (mg/100 g)	93
Manganèse (mg/100 g)	0,061
Phosphore (mg/100 g)	810
Potassium (mg/100 g)	1190
Sélénium (µg/100 g)	14
Sodium (mg/100 g)	360
Zinc (mg/100 g)	3,91
Rétinol (µg/100 g)	228
Beta-Carotène (µg/100 g)	170
Vitamine D (µg/100 g)	1,2
Vitamine E (mg/100 g)	0,68
Vitamine C (mg/100 g)	10
Thiamine (mg/100 g)	0,33
Riboflavine (mg/100 g)	1,42
Niacine (mg/100 g)	0,65
Acide pantothénique (mg/100 g)	2,27
Vitamine B6 (mg/100 g)	0,3
Folates (µg/100 g)	37
Vitamine B12 (µg/100 g)	3,25

⁴⁵ Lait en poudre, entier – Table ciqual de la composition nutritionnelle des aliments | N.D. ANSES. Consulté le 2 janvier 2023, <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/19021/lait-en-poudre-entier>

Tableau 48 : Composition nutritionnelle de l'Arthrospira platensis (Revellame et al., 2021)

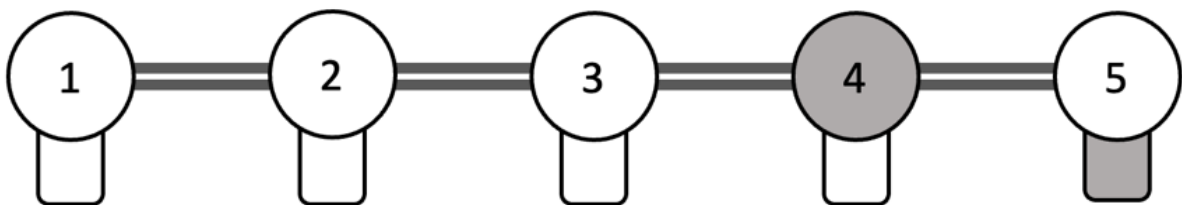
		g pour 100g de matière sèche	
Nutriment	A. platensis	Nutriment	A. platensis
Total carbohydrates	8-14	Total fats/lipids	4-9
<i>Composition (%)</i>		<i>Composition (%)</i>	
Glucose	54.4	Saturated fatty acids	25.4
Rhamnose	22.3	Monounsaturated fatty acids	28.0
Arabinose	-	Polyunsaturated fatty acids	38.3
Mannose	9.3	Others	8.3
Xylose	7.0	Vitamins	
Maltose	-	A (β -carotene)	0.34-84
Lactose	-	C	8.0-10.1
Fructose	-	B1 (thiamin)	2,4-4,4
Galactose	2.6	B2 (riboflavin)	3.7
Other sugars	4.4	B3 (niacin)	12.8
Total proteins	46-63	B5 (pantothenic acid)	1.3
<i>Composition (%)</i>		B6 (pyridoxine)	0.3-0.4
Arginine	7.0	B9 (folate)	0.04-0.094
Histidine	2.1	B12 (cobalamin)	0.7b
Isoleucine	6.4	E	5-12
Leucine	9.3	K	0.0255
Lysine	4.6		
Methionine	2.4		
Phenylalanine	5.0		
Threonine	5.9		
Tryptophan	0.3		
Valine	6.8		
Cysteine	0.9		
Proline	4.0		
Alanine	9.0		
Aspartate	11.2		
Glutamate	9.8		
Glycine	5.4		
Serine	4.9		
Tyrosine	5.0		

ANNEXE III. QUESTIONNAIRE DE DÉGUSTATION PERSONNEL DES ÉCHANTILLONS

Nom de l'échantillon : _____

Consignes :

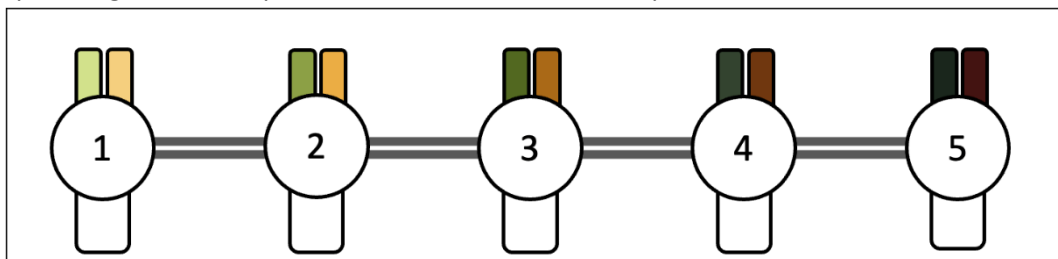
- Indiquez le nom de l'échantillon
- Pour chaque critère, cochez la case avec le numéro qui correspond au mieux à l'échantillon présenté.
- Pour chaque critère, cochez le signet qui correspond au mieux à votre optimum personnel.
- Les échelles vont de 1 à 5.
 - Sur l'échelle fictive suivante, l'échantillon présenté possède des caractéristiques estimées à 4, mais l'optimum personnel se situe à 5.



APPARENCE

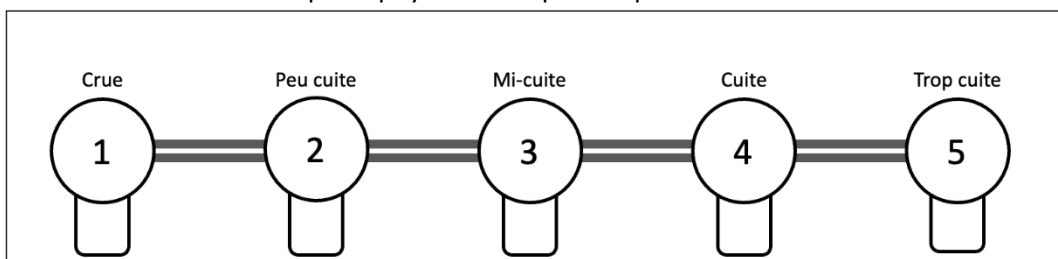
Couleur

Les couleurs vont du plus clair au plus foncé. La couleur du signet supérieur gauche de chaque nombre s'applique aux gaufres à la spiruline et ceux de droites sans spiruline.



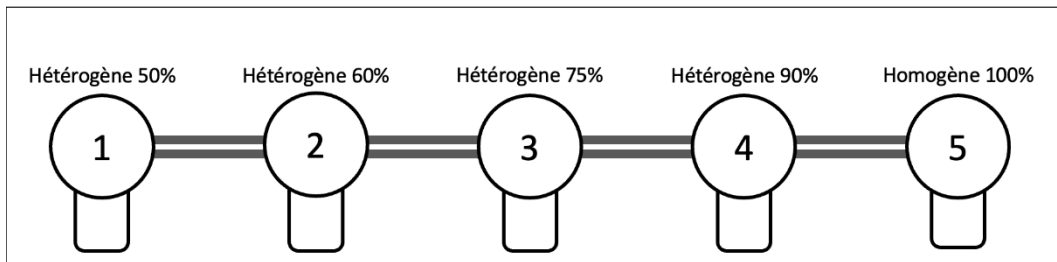
Cuisson de la pâte

La cuisson est l'évolution des aspects physicochimiques du produit sous l'effet de la chaleur.



Homogénéité de la pâte

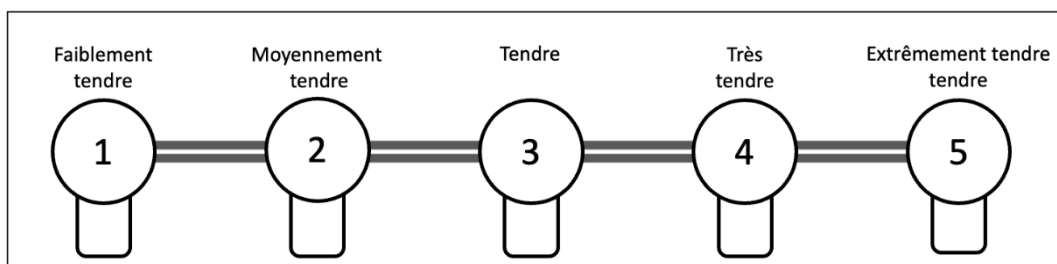
L'homogénéité de la pâte exprime la proportion de cuissons différentes au sein du produit. Le pourcentage représente la quantité du produit ayant la même cuisson.



TEXTURE

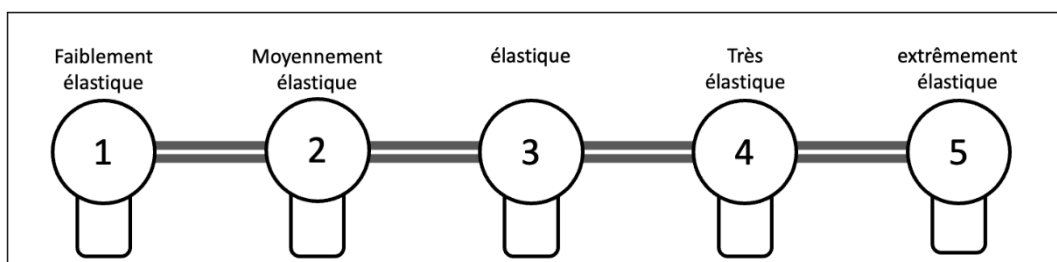
Tendreté

La tendreté du produit se caractérise par la facilité de mordre dans le produit et la capacité à le mâcher aisément.



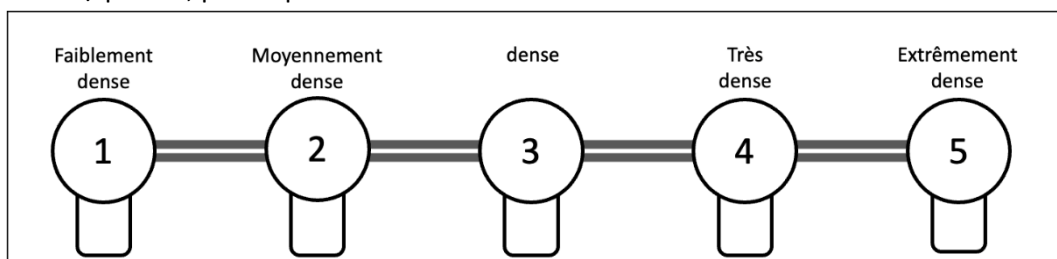
Elasticité

L'élasticité est la capacité du produit à reprendre sa forme initiale après une déformation légère et répétée.



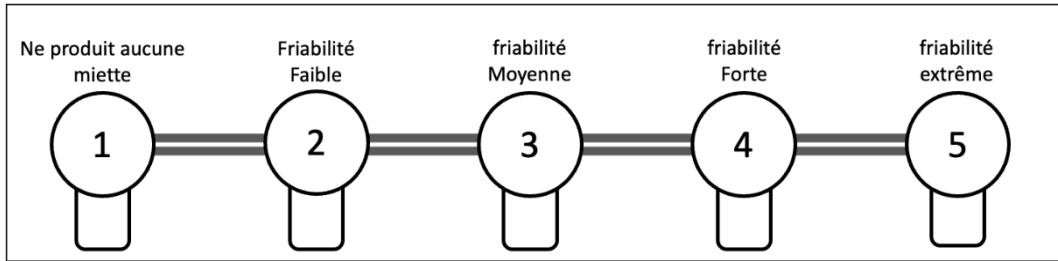
Densité

La densité représente l'espace entre la matière du produit. Moins il y a d'alvéole et plus celles-ci sont rapprochées / petites, plus le produit est dense.



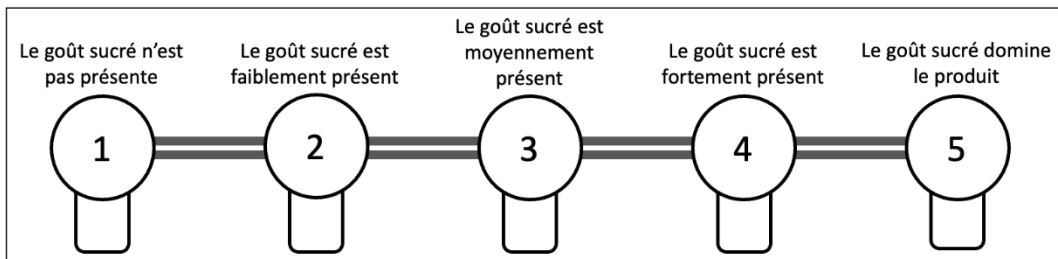
Friabilité

La friabilité représente la capacité du produit à produire des miettes, il y a une absence de cohésion, un émiettement lors de la manipulation ou la consommation du produit.

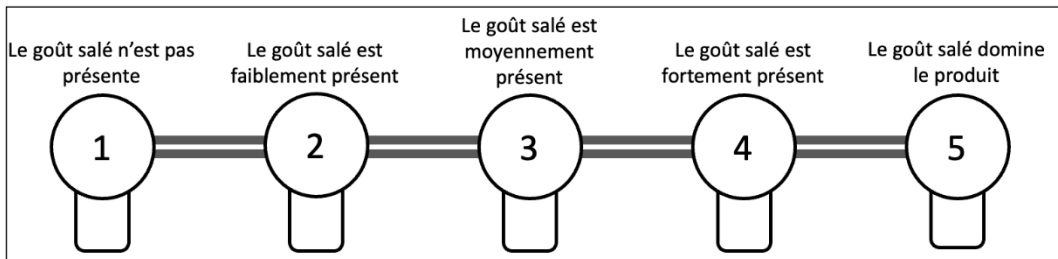


SAVEUR

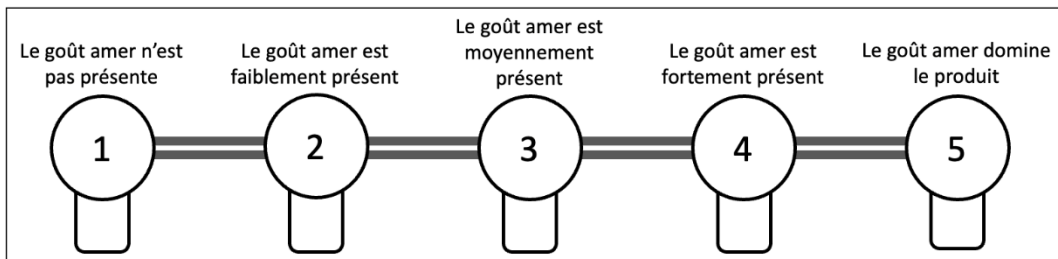
Sucré



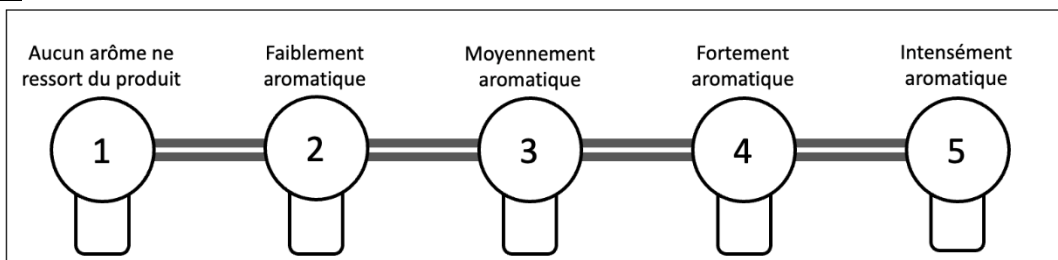
Salé



Amer

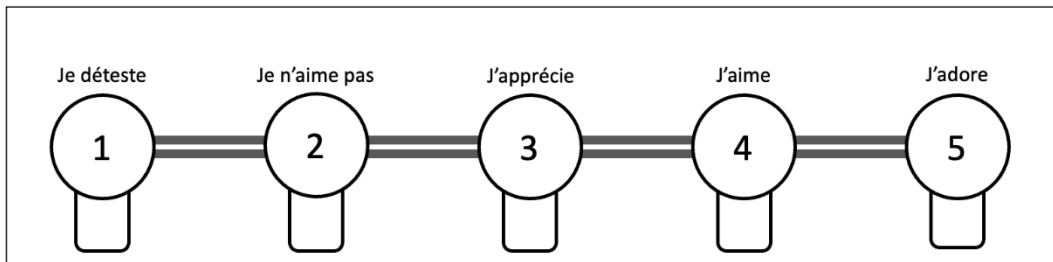


Arômes



IMPRESSION GÉNÉRALE

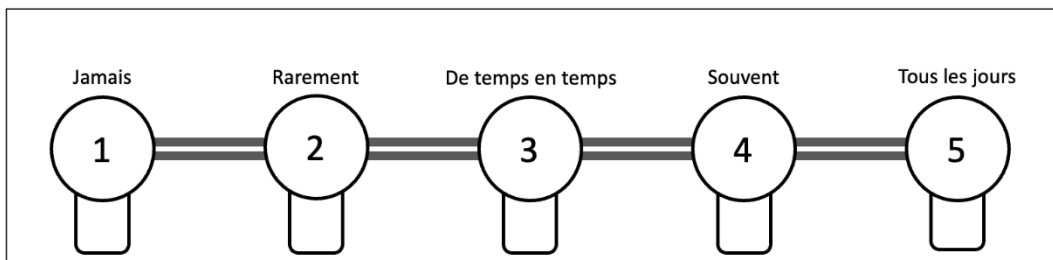
Lorsque je consomme le produit :



Commentaires (Qu'est-ce que j'ai aimé / n'ai pas aimé) :

ACCEPTABILITÉ GÉNÉRALE

Je pourrais en consommer :



ANNEXE IV. DÉTAIL DES SCORES ATTRIBUÉS AUX DIFFÉRENTS ÉCHANTILLONS

Tableau 49 : détails des scores attribués aux différents échantillons

Echantillon	Couleur	Cuisson de la pâte	Homogénéité	Tendreté	Elasticité	Densité	Friabilité	Sucré	Salé	Amer	Arômes	Impression	Acceptabilité	Apparence	Texture	Saveur	Impression score	Acceptabilité score	Total
Com	3	4	4	3	3	1	2	3	1	1	4	4	5	2	3	0	3	0	5
Cf.B.G	3	3	3	2	3	3	3	2	1	1	3	4	4	7	11	3	3	3	21
Cf.B.MW.9	1	4	5	2	2	1	2	2	1	1	2	4	3	2	5	4	3	6	11
Cf.B.MW.6	1	4	4	3	3	1	2	2	1	1	2	4	3	4	3	4	3	6	11
Cf.B.MW.4	1	3	3	3	3	1	2	2	1	1	2	4	3	9	3	4	3	6	16
Cf.R.G	3	4	1	3	3	2	3	2	1	1	3	4	4	8	8	3	3	3	19
Cf.R.MW.9	1	4	5	1	1	1	2	2	1	1	2	4	3	2	7	4	3	6	13
Cf.R.MW.6	1	4	5	2	1	2	2	2	1	1	2	4	3	2	8	4	3	6	14
Cf.R.MW.4	1	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	4	3	9	7	4	3	6	20
Cs.B.G#B	3	3	1	2	3	4	3	3	1	1	3	4	3,5	11	13	1	3	4,5	25
Cs.B.G#Mi	3	3	1	3	3	3	3	2	1	1	3	4	3,5	11	10	3	3	4,5	24
Cs.B.G#SMG	3	3	1	1	2	4	3	2	1	1	3	4	3,5	11	15	3	3	4,5	29
Cs.B.MW#B	1	4	4	3	3	2	1	2	1	1	2	3	2,5	4	2	4	6	7,5	10
Cs.B.MW#Mi	1	3,5	4	3	3	2	1	2	1	1	2	3	2,5	5,5	2	4	6	7,5	11,5
Cs.B.MW#SMG	1	3,5	4	3	3	2	1	2	1	1	2	3	2,5	5,5	2	4	6	7,5	11,5
Cs.R.G#B	1	4	3	3	2	2	2	3	1	1	3	4	3	6	6	1	3	6	13
Cs.R.G#Mi	1	3	3	2	2	3	2	3	1	1	3	4	3	9	9	1	3	6	19
Cs.R.G#SMG	1	3	3	1	2	4	2	3	1	1	3	4	3	9	12	1	3	6	22
Cs.R.MW#B	1	4	5	3	3	3	2	1	2,5	1	1	3	4	3	7	10	6	3	20
Cs.R.MW#Mi	2	4	4	1	1	2	1	2	1	1	3	2	2	3	6	3	9	9	12
Cs.R.MW#SMG	1	4	4	2	2	2	1	2,5	1	1	3	4	3	4	4	2	3	6	10
Cs.R.MW#Plat	1	4	4	2	2	2	1	2	1	1	2	4	3	4	4	4	3	6	12
Sf.R.G#Set	4	4	3	2	2	2	4	2	2	4	3	1	1	5	13	14	12	12	32
Sf.R.G#Sas	3	4	3	2,5	3	2	4	3	1	1,5	3	4	3	4	11,5	2,5	3	6	18
Sf.R.MW#Set	5	5	5	3	1	3	2	1,5	1	3	4	2	1	5	9	9	9	12	23
Sf.R.MW#Sas	5	4	5	3	3	2	1	2	1	1,5	3	3	2,5	2	2	4,5	6	7,5	8,5
Sf.R.G#Sas2	4	4	4	3	3	2	4	3	1	1	3	4	3	3	11	1	3	6	15
Sf.R.MW#Sas2	5	4	5	3	3	2	1	3	1	1	4	3	3	2	2	0	6	6	4
Cs.R.OH.V1#SMG	2	4	5	3	2	2	1	3	1	1	3	3	3	1	3	1	6	6	5
Cs.R.OH.V1.5#SMG	2	4	5	3	3	1	1	3	1	1	3	4	3	1	0	1	3	6	2
Cs.R.OH.V2#SMG	2	4	5	3	3	1	1	3	1	1	3	4	3	1	0	1	3	6	2
Sf.R.OH.V1#Sas	5	4	5	2	2	2	1	3	1	1	4	3	3	2	4	0	6	6	6
Sf.R.OH.V1.5#Sas	5	4	5	3	3	1	1	3	1	1	4	4	3	2	0	0	3	6	2
Sf.R.OH.V2#Sas	5	4	5	3	3	1	1	3	1	1	4	4	3	2	0	0	3	6	2

