

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Génie des Procédés

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Portée par

Unité de recherche UMR Qualisud

Conception intégrée, multi-échelle et multi-objectif d'une unité mobile de transformation de fruits et légumes

Présentée par **Timoty SAVOURÉ**
Le 7 Décembre 2021

Sous la direction d'**Antoine COLLIGNAN**
et de **Manuel DORNIER**

Devant le jury composé de

Catherine BONAZZI, Directrice de Recherche, INRAE

Ludovic MONTASTRUC, Professeur, ENSIACET

Catherine AZZARO-PANTEL, Professeure, ENSIACET

Michel RIVIER, Chercheur, CIRAD

Victor NONO, Président, AS FOOD INTERNATIONAL

Antoine COLLIGNAN, Professeur, Montpellier SupAgro

Manuel DORNIER, Professeur, Montpellier SupAgro

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Invité

Invité

Directeur de thèse

Co-directeur de thèse



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**

SupAgro Montpellier

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE MONTPELLIER SUPAGRO

En Génie des Procédés

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Portée par

Unité de recherche UMR Qualisud

Conception intégrée, multi-échelle et multi- objectif d'une unité mobile de transformation de fruits et légumes

Présentée par Timoty SAVOURÉ
Le 7 Décembre 2021

Sous la direction d'Antoine COLLIGNAN et de Manuel DORNIER

Devant le jury composé de

Catherine BONAZZI, Directrice de Recherche, INRAE

Ludovic MONTASTRUC, Professeur, ENSIACET

Catherine AZZARO-PANTEL, Professeure, ENSIACET

Michel RIVIER, Chercheur, CIRAD

Victor NONO, Président, AS FOOD INTERNATIONAL

Antoine COLLIGNAN, Professeur, Montpellier SupAgro

Manuel DORNIER, Professeur, Montpellier SupAgro

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Invité

Invité

Directeur de thèse

Co-directeur de thèse

Résumé

En Afrique subsaharienne, les revenus des producteurs agricoles sont faibles et les pertes post-récolte de fruits et légumes sont importantes. C'est le cas du gombo qui est un légume très apprécié des consommateurs en raison de ses propriétés gluantes. Mais la dégradation de ces propriétés pendant le procédé de conservation freine la consommation locale du gombo sous forme stabilisée. Pour répondre à ces problématiques, la société AS FOOD INTERNATIONAL souhaite développer une unité mobile de transformation (UMT) capable de transformer différents types de fruits et légumes (mangue, ananas, gombo) en purées et/ou en jus. Le principal objectif de cette étude est d'optimiser la conception de cette UMT en mettant en œuvre une méthodologie adaptée.

Dans un premier temps le travail de recherche s'est concentré sur le gombo pour : (i) identifier comment mesurer ses propriétés rhéologiques et texturales, (ii) rechercher les méthodes de mesure instrumentale les plus adaptées pour prédire la perception sensorielle de la texture gluante et (iii) suivre la dégradation de la texture du gombo pendant la stabilisation thermique. Les résultats montrent que l'indice de consistance K et le filant sont deux mesures instrumentales nécessaires et suffisantes pour caractériser et discriminer les propriétés rhéologiques et texturales de purées de gombo. Une analyse sensorielle a montré que le gluant est « une propriété texturale complexe résultant de la perception subjective et combinée des propriétés élongationnelles et visqueuses de matrices semi-solides ». Pour prédire la perception sensorielle des sauces gombo, il faut combiner la mesure instrumentale de l'indice de consistance K avec celle du filant. Un plan d'expérience a permis d'identifier les paramètres cinétiques permettant de décrire, modéliser et prédire l'évolution de ces deux indicateurs texturaux en fonction du pH et de la température de stabilisation thermique. Ces résultats ont été utilisés pour construire un modèle capable de prédire la qualité texturale finale d'une purée de gombo en fonction du barème, du format de l'emballage et du type d'autoclave.

Dans un second temps, un outil d'aide à la décision a été développé et utilisé pour optimiser la conception de l'UMT. Tout d'abord, l'analyse de l'environnement d'utilisation de l'UMT a permis de définir le scénario d'utilisation et les objectifs de conception. Les variables de conception ont été définies en utilisant une approche de conception intégrée de façon à tenir compte des interactions entre les conditions d'exploitation et la structure de l'UMT. Ensuite, l'UMT a été décomposée hiérarchiquement en 3 niveaux fonctionnels. Au niveau de l'opération unitaire, des modèles prédictifs tenaient compte des caractéristiques des équipements possibles. A ce niveau, le modèle prédictif de la qualité finale de la purée de gombo (et des 3 autres produits finis) a été intégré. Au niveau du procédé, un simulateur d'événements discrets estimait les performances de la ligne de production pour chaque produit fini. Les performances économiques de l'UMT étaient calculées au niveau de l'atelier. Une échelle de temps caractéristique était associée à chaque niveau fonctionnel et des méthodes de couplage adaptées ont permis de gérer les flux d'informations entre ces 3 niveaux. Puis, les préférences du décideur ont été modélisées et un algorithme d'optimisation a été intégré. L'outil d'aide à la décision a enfin été utilisé et amélioré de façon itérative. Pour cela, les résultats générés étaient visualisés et analysés après chaque itération. Cette démarche a permis de comprendre finement le problème de conception et d'obtenir une solution de conception satisfaisante, faisable et cohérente.

Ce travail a conduit à formaliser une méthodologie de conception intégrée combinant les méthodes de simulation multi-échelle et les méthodes d'optimisation multi-objectifs existantes. Elle peut être utilisée pour résoudre de nombreux problèmes de conception.

Mots clés : Optimisation Multi-objectif; Outil d'aide à la conception; Unité Mobile de Transformation; Gombo; Texture; Gluant

Abstract

In sub-Saharan Africa, farmers' incomes are low and post-harvest losses of fruit and vegetables are high. This is the case for okra, a vegetable highly appreciated by consumers because of its slimy properties. However, the degradation of its rheological and textural properties during the preservation process is a major obstacle to the local consumption of okra in stabilised form. To address these issues, AS FOOD INTERNATIONAL intends to develop a mobile processing unit (MPU) capable of processing different types of fruits and vegetables (mango, pineapple, okra) into purees and/or juices. The main objective of this study is to optimise the design of this MPU by implementing a suitable methodology.

In a first stage, the research work focused on okra to: (i) identify how to measure its rheological and textural properties, (ii) search for the instrumental measurement methods which are the most suitable to predict the sensory perception of the slimy texture and (iii) monitor the degradation of the texture of okra during thermal stabilisation. Results show that the consistency index K and the stringiness are two necessary and sufficient instrumental measures to characterise and discriminate the rheological and textural properties of okra purées. Sensory analysis showed that sliminess is "a complex textural property resulting from the subjective and combined perception of elongational and viscous properties of semi-solid matrices". To predict the sensory perception of okra sauces, it is necessary to combine the instrumental measurement of the consistency index K with the one of stringiness. An experimental design was conducted to identify the kinetic parameters for describing, modelling and predicting the evolution of these two textural indicators as a function of pH and stabilisation temperature. These results were used to build a model capable of predicting the final textural quality of an okra puree as a function of sterilisation temperature, packaging format and type of autoclave.

In a second step, a decision support tool was developed and used to optimise the design of the MPU. First, the analysis of the environment of the MPU enabled to define the usage scenario and the design objectives. The design variables were defined using an integrated design approach in order to take into account the interactions between the operating conditions and the structure of the MPU. Then, the MPU was hierarchically decomposed into 3 functional levels. At the unit operation level, predictive models took into account the characteristics of the possible equipment. At this level, the model predicting the final quality of okra puree (and of the 3 other final products) was embedded. At the process level, a discrete event simulator estimated the performance of the production line for each final product. The economic performance of the MPU was calculated at the plant level. A characteristic time scale was associated with each functional level and suitable bridging methods were used to manage the information flows between these 3 levels. Then, the preferences of the decision maker were modelled and an optimisation algorithm was implemented. Finally, the decision support tool was used and improved in an iterative way. For this purpose, the generated results were visualised and analysed after each iteration. This approach enabled a detailed understanding of the design problem and the achievement of a design solution that was satisfactory, feasible and consistent. This work led to the formalisation of an integrated design methodology combining existing multi-scale simulation methods and multi-objective optimisation methods. This comprehensive design methodology can be used to solve many design problems.

Key words: Multi-objective optimisation; Design Support Tool; Mobile Processing Unit; Okra; Texture; Sliminess

Remerciements

J'adresse mes vifs remerciements à l'entreprise AS FOOD INTERNATIONAL et à l'ANRT pour avoir accepté de financer ce travail et au CIRAD pour son accueil. Je remercie particulièrement Victor Nono pour son soutien, sa bienveillance et son optimisme.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse Antoine Collignan et Manuel Dornier pour la qualité de leur encadrement et pour leur relecture rapide et la réactive.

Je remercie également Michel Rivier, Martial Madoumier, Isabelle Maraval, Nelly Forestier et Nawel Achir pour leur contribution à ce travail.

Merci aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail.

Merci également à Laurent Vachoud, Julien Ricci et Layal Dhadouh pour la formation apportée sur les méthodes de mesure rhéologiques et texturales

J'exprime aussi ma reconnaissance aux stagiaires Nourdène Dhaouadi, Amélie Bécard, Christelle Nono, Nazaire, Thomas Robert, Awa N'Diaye, Milena Petrovic et Harouna Chaibou Adamou pour leur implication et leur contribution. Je leur souhaite la plus grande réussite.

Je remercie également Brice Atchay N'da Agui-Miezan et Othmane Ennasri, mes collègues d'AS FOOD pour leur participation à la collecte des données équipement et contextuelles que j'ai utilisé dans ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les membres de l'UMR QUALISUD qui ont contribué, de près ou de loin, à ce travail de thèse. Je pense notamment à Jean-Michel Méot et Philippe Bohuon pour le support qu'ils m'ont apporté avec Comsol et à Francis Courtois pour son initiation à Python. Je remercie également Patrice Thauhay pour les cellules de traitement thermique.

J'exprime aussi ma reconnaissance aux techniciens du CIRAD qui m'ont aidé à réaliser mes manipulations expérimentales. Je pense à Julien Ricci, Antoine Delpech, Adrien Servent, Charlotte Delpech et Brigitte Pons.

Je remercie également les secrétaires de l'équipe 3 qui se sont succédé et qui m'ont épargné certaines lourdeurs administratives : Nadine Lopez, Anaïs Novi, Anaïs Gribonval et Léna Cheikhe.

Merci également à Laurent Martin pour sa participation aux réunions sur l'unité mobile. Son expérience m'a été d'une grande aide.

Je remercie aussi les 16 juges du panel d'analyse sensorielle qui ont accepté de tester des sauces gluantes. Merci également aux consommateurs qui ont participé à l'analyse sensorielle consommateur.

J'exprime ma reconnaissance aux différents acteurs ivoiriens que j'ai rencontré pour le temps qu'ils m'ont consacré.

J'adresse une pensée particulière à tous les enseignants qui m'ont transmis leurs connaissances. Je pense notamment à Mr Adam de Villiers, Mr Abehsirah, Mme Duval, Mr Oswald et Mr Liscia.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien tout le long de ce travail. Je remercie mes parents pour l'éducation qu'ils m'ont apporté et les valeurs qu'ils m'ont transmises. Je remercie mes grands-parents pour m'avoir fait découvrir l'univers de la bouffe du champ à la fourchette.

Je remercie aussi mes amis avec une pensée particulière pour la tropiteam et les soirées enflammées au Nu bahia qui ont rythmé les premières années de ce travail de thèse ! S'ils lisent ces lignes, il se reconnaîtront !

Enfin et surtout, un immense merci à ma splendide et merveilleuse complice pour son soutien sans faille. Tu as été un rayon de soleil quotidien pendant cette année de rédaction.

Je dédie ce travail à tous les paysans qui nous font vivre. Je pense en particulier à tous les paysans rencontrés à Madagascar, au Burkina Faso, au Libéria, au Cameroun, au Ghana, au Sénégal, au Togo, en Côte d'Ivoire et à Cuba. J'espère que l'unité mobile d'AS FOOD INTERNATIONAL verra le jour et contribuera à l'augmentation de leurs revenus.

Cette thèse « a quelque chose (...) d'un combat au vif de son art pour atteindre par ses propres forces, contre ses vents intimes, ce qui constitue notre Extrême-Amont d'homme (...). Pour moi, ce fut de surmonter ma neuvième forme. (...)

A un moment, il apercevra la dernière case, tout au bout d'une chute vertigineuse. Il relèvera alors la tête et il aura cette sensation qui va lui percer la colonne vertébrale de part en part, cette sensation qu'on a, de fierté impartageable, après un effort tellement fou et soutenu, quand on va vraiment au bout de ce qu'on peut ». Alain Damasio, La horde du Contrevent, Tome I – Le Cosmos est mon campement.

Liste des articles et conférences scientifiques

Publications parues:

Savouré, T., Dornier, M., Vachoud, L., & Collignan, A. (2020). Clustering of instrumental methods to characterize the texture and the rheology of slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) suspensions. *Journal of Texture Studies*, jtxs.12505. 51(3), 426-443. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12505>

Savouré, T., Dornier, M., Maraval, I., & Collignan, A. (2021). Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (*Abelmoschus Esculentus*) preparations and its correlation with instrumental parameters. *Journal of Texture Studies*, jtxs.12583. 52(3), 314-333. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12583>

Publications à soumettre à la revue Food and Bioproducts Processing:

Savouré, T., Madoumier, M., Rivier, M., Dornier, M., & Collignan, A. Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants. Part 1: Methodology

Savouré, T., Madoumier, M., Rivier, M., Dornier, M., & Collignan, A. Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants. Part 2: Application to a mobile fruit and vegetable processing unit

Présentation orale:

Savouré, T., Dornier, M., Maraval, I., Forestier, N., Vachoud, L., & Collignan, A. (2018). Texture characterization of African slimy sauces. 32nd EFFost International Conference, 05 - 08 Novembre, Nantes, France.

Poster:

Savouré, T., Dornier, M., Maraval, I., Forestier, N., Vachoud, L., & Collignan, A. (2018). Texturometry, rheology and quantitative descriptive analysis to identify relevant instrumental methods to measure the slimy texture of okra sauces. 19th IUFoST World Congress of Food Science and Technology, 23 - 27 Octobre, Bombay, Inde.

Table des matières

Résumé	i
Abstract.....	ii
Remerciements	iii
Liste des articles et conférences scientifiques	v
Table des matières	vi
Liste des figures	xi
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des abréviations.....	xvi
Avant-propos	1
Chapitre 1 : Introduction bibliographique et objectifs de l'étude.....	3
1. Contexte d'utilisation et justification du besoin d'une unité mobile de transformation de fruits et légumes.....	3
1.1. La problématique des pertes post-récolte de fruits et légumes en Afrique subsaharienne	3
1.2. Contexte du cas d'étude : la Côte d'Ivoire.....	6
1.3. Solution à concevoir : l'unité mobile de transformation de fruits et légumes.....	8
2. Méthodes de conception existantes	9
2.1. La conception intégrée et multi-échelle d'ateliers discontinus.....	9
2.2. La conception multi-objectif en génie des procédés alimentaires	10
3. La problématique spécifique du gombo.....	11
3.1. Fruits et légumes que l'UMT doit pouvoir transformer	11
3.2. Ingrédients des sauces gluantes et critères de qualité recherchés.....	11
3.3. Composition du gombo et propriétés rhéologiques de son mucilage.....	12
3.4. Effets du procédé sur la qualité du gombo.....	13
3.5. La texture gluante : définitions et mesures instrumentales.....	13
4. Objectifs de l'étude et stratégie de recherche	14
4.1. Questions de recherche et objectifs de l'étude	14
4.2. Stratégie de recherche mise en œuvre	15
Chapitre 2: Clustering of instrumental methods to characterize the texture and the rheology of slimy okra (<i>Abelmoschus esculentus</i>) suspensions (Publication n°1).....	19
1. Introduction.....	20
2. Materials and methods.....	21
2.1. Sample generation.....	21

2.2.	Instrumental measurement methods	24
2.3.	Data processing and statistics	27
3.	Results and discussion	27
3.1.	Rheological and textural properties of okra suspensions	27
3.2.	Repeatability of instrumental measurements	29
3.3.	Reduction of the number of instrumental parameters.....	31
3.1.	Ability of the stringiness and flow parameters to characterize the impact of the process and formulation on the textural properties of okra	35
4.	Conclusion.....	38
Chapitre 3: Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (<i>Abelmoschus esculentus</i>) preparations and its correlation with instrumental parameters (Publication n°2)		42
1.	Introduction.....	43
2.	Materials and methods.....	44
2.1.	Sample preparation.....	44
2.2.	Sensory analysis	45
2.3.	Instrumental measurement methods	47
2.4.	Data processing and statistics	47
3.	Results and discussion	49
3.1.	Identification of relevant attributes to describe the texture of slimy preparations.	49
3.2.	Quality and differentiating power of sensory attributes	50
3.3.	Correlation of sensory attributes with each other and with instrumental parameters 52	
3.4.	Prediction of sensory attributes with instrumental parameters	55
3.5.	Ranking of samples according to sliminess	58
4.	General Discussion	62
4.1.	Characterization and prediction of the textural perception of slimy preparations with the measurement of stringiness and consistency index K.....	62
4.2.	Bi-dimensional and subjective perception of sliminess.....	63
5.	Conclusion.....	64
Chapitre 4: Cinétiques de dégradation de la texture de purées de gombo au cours de la stabilisation thermique (70-130 °C)		68
1.	Introduction.....	68
2.	Matériel et méthode.....	68
2.1.	Génération des échantillons	68
2.2.	Méthodes de mesure instrumentales	70
2.3.	Analyse des résultats.....	72

2.4.	Analyse du plan d'expériences.....	72
3.	Résultats.....	72
3.1.	Paramètres cinétiques estimés pour tous les points expérimentaux.....	72
3.2.	Résultats du plan d'expériences.....	73
3.3.	Modélisation arrhéniennne de la dégradation de la texture du gombo par pH.....	74
4.	Discussion.....	76
5.	Conclusion.....	77
Chapitre 5: Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants.		
Part 1: Methodology (Publication n°3).....		
1.	Introduction.....	81
2.	Méthodologie de conception intégrée, multi-échelle et multi-objectif d'ateliers de transformation alimentaire.....	82
2.1.	Objectifs et aperçu général de MIMMODS.....	82
2.2.	Clarification du problème de conception.....	84
2.3.	Développement d'un modèle de simulation multi-échelle du système à concevoir	85
2.4.	Modélisation des préférences et choix d'une méthode de sélection.....	87
2.5.	Sélection d'une méthode d'optimisation.....	88
2.6.	Implémentation de l'outil d'aide à la conception.....	89
2.7.	Visualisation et analyse des résultats.....	91
2.8.	Amélioration itérative de l'outil d'aide à la conception.....	92
3.	Opportunités et défis relatifs à la mise en œuvre de la méthodologie.....	93
3.1.	Opportunités.....	93
3.2.	Défis.....	94
4.	Conclusion.....	96
Chapitre 6: Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants.		
Part 2: Application to a mobile fruit and vegetable processing unit (Publication n°4).....		
1.	Introduction.....	100
2.	Développement d'un outil d'aide à la conception en utilisant la méthodologie MIMMODS	101
2.1.	Clarification du problème de conception.....	101
2.2.	Développement d'un outil de simulation multi-échelle de la MPU.....	108
2.3.	Modélisation des préférences et choix d'une méthode de sélection.....	112
2.4.	Méthode d'optimisation.....	114
2.5.	Outils et logiciels utilisés pour implémenter l'outil d'aide à la conception.....	114
3.	Visualisation et analyse des solutions de conceptions obtenues.....	115
3.1.	Niveau de satisfaction des solutions obtenues.....	115

3.2. Performances de la solution obtenue et faisabilité dans le contexte d'utilisation	121
3.3. Cohérence des décisions de conception associées à la solution obtenue	126
3.4. Priorisation des améliorations possibles	127
4. Conclusions	128
Discussion Générale	130
1. Avantages et inconvénients de la stratégie de conception mise en œuvre.....	130
1.1. Amélioration de la connaissance du gombo et de la texture gluante	130
1.2. Analyse critique de la stratégie mise en œuvre pour concevoir l'UMT.....	132
2. Apports méthodologiques et applications possibles de MIMMODS	135
2.1. Principaux apports méthodologiques proposés	135
2.2. Souplesse, généricité et applications possibles de MIMMODS.....	137
Conclusion Générale et perspectives de recherche.....	141
Références bibliographiques liées au gombo.....	145
Références bibliographiques liées à la conception de l'unité mobile de transformation ...	151
Références bibliographiques correspondantes aux outils et logiciels informatiques utilisés	159
Liste des figures	161
Liste des tableaux.....	162
Annexe n°1: Modèles utilisés pour construire l'outil d'aide à la décision.....	165
1. Modèles utilisés au niveau de l'opération unitaire.....	165
1.1. Modélisation des opérations unitaires en fonction des caractéristiques des équipements	165
1.2. Rendements matière par opération unitaire.....	166
1.3. Transferts et stockage de produits intermédiaires	166
1.4. Lavage et tri-parage.....	167
1.5. Blanchiment	168
1.6. Broyage.....	171
1.7. Dépulpage.....	172
1.8. Pressurage.....	173
1.9. Homogénéisation	174
1.10. Remplissage	176
1.11. Sealing and capping	177
1.12. Stabilisation thermique.....	178
1.13. Modélisation du nettoyage.....	186
2. Modèles utilisés au niveau du procédé.....	188

2.1.	Description du simulateur d'évènements discrets.....	188
2.2.	Organisation des simulations.....	191
2.3.	Calcul des indicateurs de performance au niveau du procédé.....	192
3.	Modèle utilisés au niveau de l'atelier.....	193
3.1.	Calcul des indicateurs de performance au niveau de l'atelier.....	193
3.2.	Hypothèses générales pour les calculs à l'échelle de l'atelier.....	193
3.3.	Calculs du coût de location mensuel de la MPU.....	193
3.4.	Coût mensuel en matières premières.....	198
3.5.	Coût mensuel en emballages.....	199
3.6.	Calcul du coût mensuel des utilités.....	200
3.7.	Calcul du coût mensuel en main d'œuvre.....	201
3.8.	Calcul du chiffre d'affaire mensuel.....	201
	Annexe n°2 – Modèles de préférence.....	202
1.	Choix des seuils de désirabilité pour la qualité organoleptique.....	202
	Annexe n°3– Résultats complémentaires de l'étude de cas.....	203
1.	Performances des meilleures solutions.....	203
2.	Analyse des décisions de conception associées à la solution obtenue.....	204
3.	Priorisation des améliorations possibles.....	206

Liste des figures

<i>Figure 1 : Part de pertes et gaspillage de fruits et légumes par niveau de la chaîne alimentaire en Afrique subsaharienne et en Europe (Gustavsson, 2011). Ces pourcentages correspondent à la diminution de masse d'aliments qui a été certifiée ou estimée à chaque étape de la chaîne de valeur.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2 : Aperçu général et simplifié de la localisation des bassins de production des fruits et légumes d'intérêts et de la saisonnalité des récoltes en Côte d'Ivoire (figure réalisée à partir de la carte de Côte d'Ivoire du Larousse).....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 3 : Echelles de longueur et de temps caractéristiques correspondant aux niveaux fonctionnels et phénomènes d'un atelier de transformation alimentaire.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 4 : Stratégie de recherche mise en œuvre pour atteindre les objectifs de l'étude et structure du manuscrit de thèse.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 5: Production diagram of the 37 samples used for rheological and textural analyses.</i>	<i>21</i>
<i>Figure 6: Drawing of the experimental set-up for stringiness measuring</i>	<i>25</i>
<i>Figure 7: Elastic (G') and Viscous (G'') moduli of the 36 samples (measurements of the sample no.37 were not valid) as a function of strain at 1Hz (A and B). Reduced moduli G'/G'_0 and G''/G''_0 versus strain, where G'_0 and G''_0 are the moduli measured at the beginning of the linear viscoelastic region (see (Hyun et al., 2002)).....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 8: Distribution of coefficient of variation (CV) measured on the 37 samples for the 16 rheological and textural parameters. The numbers indicate the samples for which an extreme CV has been measured. The 10% dashed line corresponds to the threshold above which the measurement was not considered repeatable.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 9: Variation coefficient of consistency index K vs measured consistency index K. The color gradient of the points corresponds to the water content (dry matter) of the measured samples. The sample number is written when the measured value is less than 50 Pa.sn. The 10% dashed line corresponds to the threshold above which the measurement was not considered repeatable.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 10: Principal Component Analysis (PCA) bi-plot of the 16 textural and rheological parameters and the 36 samples. The explained variance for PC1 and PC2 is 66.61 % and 19.68 %. On the parameters factor map (A), Water Content is a supplementary parameter that does not contribute to the formation of the components. On the Projection of individuals (B), the number indicates samples and confidence ellipses were traced around the samples categories.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 11: Pearson correlation coefficients matrix of the 16 parameters. The lower left half shows the Pearson correlation coefficients significant at the 5% threshold. The upper right half shows the graphical representation of these coefficients: their color depends on the sign of the correlation while the size of the disks and the intensity of the color represent the intensity of the correlation.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 12: Graphical illustrations of the correlation between the consistency index K and the main rheological and textural properties of the first dimension of the PCA: flow behavior index n (A), $LVE\tau\delta$ (B), $\sigma_{G'=G''}$ (C) and firmness (D).....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 13: Graphical illustrations of the correlation between stringiness and the main rheological and textural properties of the second dimension of the PCA: $\gamma G'=G''$ (A), $G'=G''$ (B), FTI (C).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 14: The two-dimensional space formed by stringiness in combination with the consistency index K (A) and the flow behavior index n (B).....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 15: Water-dependence of flow consistency index K (A), flow behaviour index n (B) and stringiness (C) for the 37 suspensions.....</i>	<i>36</i>

Figure 16 : Principal Component Analysis (PCA) bi-plot of the 11 sensory attributes and the nine samples. On the variable factor map (A), sensory attributes are represented with black continuous arrows: attributes correlated with the “consistency dimension” are in bold whereas those correlated with the “stringy dimension” are in italic. Orange dashed arrows corresponds to supplementary variables. The add of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand (H_Stringiness) to be distinguished from the instrumental measurement (I_Stringiness). On the projection of individuals (B), confidence ellipses were traced around the categories of samples with a confidence level of 0.99. Numbers correspond to samples 52

Figure 17 : Matrix of Pearson correlation coefficients of the 11 sensory attributes and the three instrumental parameters. Values of Pearson correlation coefficients significant at the 5% threshold are indicated on the lower left half. Graphical representation of these coefficients is shown on the upper right half: colors indicate the sign of the correlation while the intensity of the color and the size of the disks represent the intensity of their correlation. The addition of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand (H_Stringiness) to be distinguished from the instrumental measurement (I_Stringiness). 54

Figure 18 : Charts of the best fitted models obtained for each sensory attribute with an instrumental parameter (for the nine samples). On each plot, point numbers correspond to samples numbers. The addition of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand (H_Stringiness) to be distinguished from the instrumental measurement (I_Stringiness). 56

Figure 19 : Hierarchical cluster analysis (HCA) of panelists according to their ranking of the perceived sliminess level of each sample. Only panelists who had a repeatable perception of sliminess were taken into account. Cluster 1 is on the right and framed in black. Cluster 2 is in the middle and framed in red. Cluster 3 is on the left and framed in green. 59

Figure 20 : Average sliminess ranking assigned to the nine samples for each of the 3 clusters (Cluster 1: A & B; Cluster 2: C & D; Cluster 3: E & F) as a function of stringiness and consistency index K. The addition of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand (H_Stringiness) to be distinguished from the instrumental measurement (I_Stringiness). 60

Figure 21 : Conditions expérimentales du plan d’expériences en réseau de Doelhart (points 1 à 9) en valeurs codées et en valeurs réelles. Les points expérimentaux supplémentaires (points 10 à 12) sont représentés en noir. 69

Figure 22 : Représentation graphique des valeurs de filant mesurées à différents temps de traitement pour les 12 points du plan d’expériences. Les valeurs prédites par le modèle cinétique identifié par pH (Tableau 16) sont représentées par une ligne grise. Les tirets rouges représentent l’intervalle de confiance du modèle et les pointillés bleus représentent l’intervalle de prédiction. 75

Figure 23 : Représentation graphique des valeurs d’indice de consistance K mesurées à différents temps de traitement pour les 12 points du plan d’expériences. Les valeurs prédites par le modèle cinétique identifié par pH (Tableau 16) sont représentées par une ligne grise. Les tirets rouges représentent l’intervalle de confiance du modèle et les pointillés bleus représentent l’intervalle de prédiction. 75

Figure 24 : Architecture and information flows of the multiscale and multi-objective optimization tool for the design of a food processing plant. 90

Figure 25 : Schematic representation of the information flows between the different steps of MIMMODS and its iterations. 92

Figure 26 : Equipment structure – flowsheet and assigned work teams. Two Okra Purée recipes (OPR) are possible: OPR1 (solid line) and OPR2 (double solid line). 101

Figure 27 : Architecture of the multi-scale simulator of the MPU, information flows between the different levels and bridging methods used. 108

Figure 28 : GDI_{AHP} values of the 5 639 non-dominated solutions of \mathcal{P} as function of their rank. The resulting solution (yellow square) is the one with the highest GDI_{AHP} value (0.253). 115

Figure 29 : Bi-PDIGAp scatter plots of \mathcal{P} , the set of 5 639 non-dominated solutions extracted from \mathcal{L} . For each plot, the black line represent the bi-PDIGAp (eq. 13) trade-off curve. The colour and size gradient represents the value of each solution GDIAHP (eq. 15). The resulting solution (Yellow Square) is the one with the highest GDIAHP value (0.253). 116

Figure 30 : Objective desirability diagram. Objective desirability Indices (ODI_{op}) calculated per objective o per final product p for the 5 639 solutions of \mathcal{P} (cf. eq. 13). ODI_{op} of the resulting solution are represented by a yellow square. The horizontal lines represent the 4 Product Desirability Index (PDI_{AHPp}) of the resulting solution calculated from the 5 ODI_{op} of each product p (eq. 14). On the x-axis, the 5 design objectives are ranked in order of importance to the users. 117

Figure 31 : Overall desirability diagram. Indicator desirability indices (IDI_{kp}) calculated per performance indicator k per final product p for the 5 639 solutions of \mathcal{P} (cf. eq. 11). The 14 IDI_{kp} are wrapped by objective. IDI_{kp} of the resulting solution are represented by a yellow square. 118

Figure 32 : Values of the performance indicators t_{prepp} (A), $MOPp$ (B) and S_{floorp} (C) as a function of the incoming flow of raw materials (A and C), or the outgoing flow of final products (B) for the 5 639 non-dominated solutions of \mathcal{P} . The values of the resulting solution are represented by a square in the color of the final product. The lower and higher thresholds of desirability defined for each performance indicator are represented by the horizontal lines. 120

Figure 33 : Breakdown of monthly operating revenue (A) and selling prices (B) of the four final products (and their packaging volume) with the resulting solution. 121

Figure 34 : 8-hour rotation production scheduling per final product simulated for the resulting solution by the DES. The colors help to distinguish the unit operations from each other. For each unit operation, the identification number of workstation (WS) is given on the left and the height of the batches is proportional to the quantity processed. 123

Figure 35: Thermal stabilization cycle durations (t_{stabp}) (A) and average quality remaining in the final product (Q_{fp}) (B) estimated per final product by the heat treatment model for all possible combinations of operating conditions (treatment temperatures and pasteurization/sterilization values) with the autoclave of the resulting solution. For each product, the values of t_{stabp} and Q_{fp} corresponding to the operating conditions of the resulting solution are represented by square. Note that in chart B, the scale corresponding to pineapple juice is shown on the right side. 125

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Superficies récoltées et quantités produites pour les principaux fruits et légumes cultivés en Côte d'Ivoire en 2019 (FAOSTAT, 2021)</i>	6
<i>Table 2. Summary of main preparation process and formulation of the 37 samples used for rheological and textural analysis</i>	23
<i>Table 3. Instrumental methods and parameters selected for characterizing rheological and textural properties of okra suspensions</i>	26
<i>Table 4. Effects of pH, water content and calcium ion content on the consistency index K, the flow behavior index n and the stringiness of cooked okra purées (samples n°5-19)</i>	37
<i>Tableau 5 : Definitions of the slimy and sliminess concepts found in the literature</i>	43
<i>Tableau 6 : Summary of preparation process and formulation of the nine samples used for the study (see Savouré et al., (2020) for an exhaustive description of sample preparation)</i>	44
<i>Tableau 7 : Definitions and protocols used for the evaluation of the 11 sensory attributes used by the panel to describe the texture of preparations made with okra</i>	46
<i>Tableau 8 : Average score (\pmstandard deviation) of the panelists on each sensory attribute for the nine slimy preparations and results of the 2-factor ANOVA</i>	49
<i>Tableau 9 : Average measured value (\pm standard deviation) on each instrumental parameter for the nine slimy preparations and results of the 1-factor ANOVA</i>	54
<i>Tableau 10 : Statistics of the best-fitted models obtained for each sensory attribute (S) with an instrumental parameter (I) for the nine samples.</i>	56
<i>Tableau 11 : Panelists' ranking of samples according to their sliminess level. For each sample, the difference between the rank in this ranking test and the rank of the nine samples according to the average score of sliminess attributed by each panelist is indicated in brackets. When this difference is strictly superior to 2 for one sample, the perception of sliminess for this sample by the panelist is considered not repeatable. Panelists for whom the perception of sliminess is not repeatable for more than 4/9 of samples were grouped together. The other panelists were grouped by cluster from the ascending hierarchical classification.</i>	58
<i>Tableau 12 : Sliminess definition and/or attributes (translated from French to English) used by the different clusters of panelists to rank the nine samples from least to most slimy. Exponents (1-, 1+ or 2+) indicates to which PCA dimension an attribute or an expression refers to. Attributes referring negatively with the 1st PCA dimension (attribute1- underlined and colored in blue), those referring positively with the 1st PCA dimension (attribute1+ underlined and colored in red) and those referring positively with the 2nd PCA dimension (attribute2+ underlined and colored in green) were counted to calculate a utilization rate for attributes of each dimension, per cluster.</i>	61
<i>Tableau 13 : Temps de prélèvement des échantillons et températures du bain de préchauffage appliquées en fonction de la température de traitement cible.</i>	69
<i>Tableau 14 : Valeurs initiales (Y_0) et constantes de vitesse (k) de la dégradation thermique du filant et de l'indice de consistance K identifiées pour les 9 points du plan d'expériences (en italique) et pour les 3 points supplémentaires (en gras).</i>	73
<i>Tableau 15 : Effets de la température du traitement et du pH sur les constantes de vitesse de dégradation du filant et de l'indice de consistance K des purées de gombo du plan d'expériences (points 1 à 12 du plan d'expériences)</i>	73

Tableau 16 : Valeurs moyennes ± intervalle de confiance à 95 % estimés à chaque pH pour les valeurs initiales (Y0) et les paramètres cinétiques (kref et Ea) de la dégradation thermique du filant et de l'indice de consistance K (Tref = 100 °C). 74

Tableau 17 : General overview of MIMMODS. Main goals of each task are summarized. Methods, tools and references that can be used to carry out each task are suggested. 83

Tableau 18 : Service functions and performance indicators associated with the 5 design objectives. The priority ranks and weights of the objectives reflect their relative importance to users (cf. part 2.3.2). 103

Tableau 19 : Summary of methods used to calculate the 14 performance indicators (the models are detailed in part 2.2.2 and in the appendices n°1) and threshold values used to set the desirability functions associated with each one (cf. part 2.3.1). 104

Tableau 20 : General overview of the different design variables and of the possible modalities/values for each of them 107

Tableau 21 : Kinetic models and Arrhenius parameters used to model the degradation of the organoleptic and/or nutritional quality of final products during pasteurization or sterilization. 110

Tableau 22 : Desirability values associated with different possible values of P0 (or F0) 112

Liste des abréviations

Abréviation / notation	Signification
AHP	Analytic Hierarchy Process
ASS	Afrique Subsaharienne
DES	Discrete Event Simulation
F_0	Sterilization value
FMECA	Failure Mode Effects and Criticality Analysis
GDI	Global Desirability Index
i	Identifiant de l'équipement faisant partie de la MPU
IDI	Indicator Desirability Index
j	Identifiant de la zone de stockage entre 2 équipements de la MPU
k	Identifiant des indicateur de performance (Y_k) et des indices de désirabilité correspondant (ID_k)
\dot{m}_{in}^p	MPU incoming flow of raw materials for the product p (kg/h)
\dot{m}_{out}^p	MPU outgoing flow of final products for the product p (kg/h)
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MIMMODS	Methodology for the Integrated, Multi-scale and Multi-Objective Design of Systems
MN	Mango Nectar
MP	Mango Purée
MPU	Mobile Processing Unit
MOOM	Multi-Objective Optimization Methods
n	Indicatif nombre d'indicateurs associés à chaque l'objectif
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm of type II
o	Indicatif de l'objectif de conception
ODI	Objective Desirability Index
OP	Okra Purée
p	Identifiant du produit fini et de la configuration de MPU correspondante
P_0	Pasteurization value
PDI	Product Desirability Index
PJ	Pineapple Juice
PPR	Pertes Post-Récoltes
q_p	Préférences pour le produit p
s_{res}	Solution obtenue
TCD	Total Color Change
UMT	Unité Mobile de Transformation
UO	Unit Operation
w_o	Objective weight (in %)
Y_k	Indicateur de performance

Avant-propos

En Afrique subsaharienne et notamment en Côte d'Ivoire, le revenu moyen des producteurs agricoles est particulièrement faible et les pertes post-récolte de fruits et légumes sont importantes. Pour répondre à ces problématiques, la société AS FOOD INTERNATIONAL souhaite développer et commercialiser une unité mobile de transformation de fruits et légumes. Cette unité doit pouvoir être déplacée au sein des zones de production enclavées d'Afrique subsaharienne. Elle doit également être flexible quant aux fruits et légumes à transformer et aux types de produits finis obtenus : purées, nectars, coulis, et jus stabilisés par traitement thermique (pasteurisation ou stérilisation). Avec la mangue et l'ananas, le gombo fait partie des fruits et légumes que cette unité doit pouvoir traiter. En termes d'emballages AS FOOD INTERNATIONAL souhaite privilégier les poches souples en polymère (type Doypack®).

La Côte d'Ivoire est le pays cible de l'entreprise pour concevoir, fabriquer et tester le premier prototype d'unité mobile. En effet, ce pays est assez représentatif des autres pays d'Afrique subsaharienne en terme de problématiques de développement (pertes post-récoltes, manque d'infrastructures et faible développement du secteur agroalimentaire), de types de zones agro-écologiques rencontrées (forêt humide et savanes arborées) et de variétés de fruits et légumes cultivés.

Toutefois, concevoir une unité mobile de transformation (UMT) alimentaire est un travail complexe. En effet, en plus des objectifs de conception qui sont couramment pris en compte pour une usine de transformation agro-alimentaire (qualité des produits finis et viabilité économique), la mobilité impose des contraintes spécifiques. D'une part, la conteneurisation de l'UMT contraint l'espace au sol disponible pour implanter les différents équipements de transformation et les opérer. D'autre part, le déplacement et l'installation de l'UMT sur différents lieux entraîne des contraintes importantes en termes d'utilités disponibles. Enfin, pour que l'UMT soit multi-produit, modulaire et aisément reconfigurable, les équipements discontinus doivent être privilégiés.

Dans ce contexte, AS FOOD INTERNATIONAL a établi un partenariat avec l'UMR QUALISUD, Montpellier Supagro et le CIRAD afin que son UMT soit conçue avec une démarche de conception multi-objectif, dans le cadre de cette thèse CIFRE. Ce manuscrit de thèse présente les travaux réalisés et les résultats obtenus au cours ce travail.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Introduction bibliographique et objectifs de l'étude

Ce chapitre présente le contexte scientifique dans lequel s'inscrit cette thèse puis de présenter les objectifs de l'étude.

Tout d'abord, la description de certains éléments contextuels explique pourquoi une unité mobile de transformation peut constituer une solution pertinente à certaines problématiques de développement (pertes post-récoltes, manque d'infrastructures et faible développement du secteur agroalimentaire). Elle permet également de justifier les objectifs de conception de l'unité mobile.

Puis, les méthodes de conception qui seront mobilisées pour concevoir l'UMT sont présentées. Comme la réflexion méthodologique approfondie qui a été menée pendant ce travail fait l'objet d'un chapitre dédié (chapitre 5), la littérature portant sur ce sujet est présentée de façon résumée.

Ensuite, la bibliographie existante sur le gombo, la texture gluante et les méthodes de mesure instrumentales de cette propriété texturale, est synthétisée.

Enfin, les objectifs de l'étude et la stratégie de recherche mise en œuvre pour y répondre sont présentés.

1. Contexte d'utilisation et justification du besoin d'une unité mobile de transformation de fruits et légumes

1.1. La problématique des pertes post-récolte de fruits et légumes en Afrique subsaharienne

Depuis une dizaine d'année, les « pertes post-récolte » (PPR) font l'objet d'une attention croissante de la part de la communauté internationale (Bellemare *et al.*, 2017; Sheahan & Barrett, 2017; Stathers *et al.*, 2020). Ce terme désigne la diminution de la quantité et/ou de la qualité des denrées alimentaires destinées à l'alimentation humaine, aux différentes étapes des chaînes alimentaires. En Afrique subsaharienne (ASS), les PPR sont estimées à environ 180 kg/an-habitant pour une production alimentaire totale d'environ 460 kg/an-habitant (Gustavsson, 2011). Les fruits et légumes font partie des denrées alimentaires pour lesquelles les PPR sont les plus importantes. Ainsi, selon les estimations et les contextes, les pertes quantitatives peuvent représenter jusqu'à 23.4 % (± 4.5) de la production de gombo et jusqu'à 55.9 % (± 25.4) de la production de mangue. De plus, les fruits et légumes dont la qualité est altérée (5 à 90 % des volumes récoltés) peuvent perdre jusqu'à 40 % de leur valeur (Affognon *et al.*, 2015). Dans un contexte où les revenus des populations rurales dépendent fortement de l'agriculture, les PPR correspondent donc à un important manque à gagner pour les différents acteurs des chaînes de valeurs, et notamment pour les producteurs. Par ailleurs, ces PPR aggravent les problèmes de sécurité alimentaire et de sécurité sanitaire des populations locales (Sheahan & Barrett, 2017).

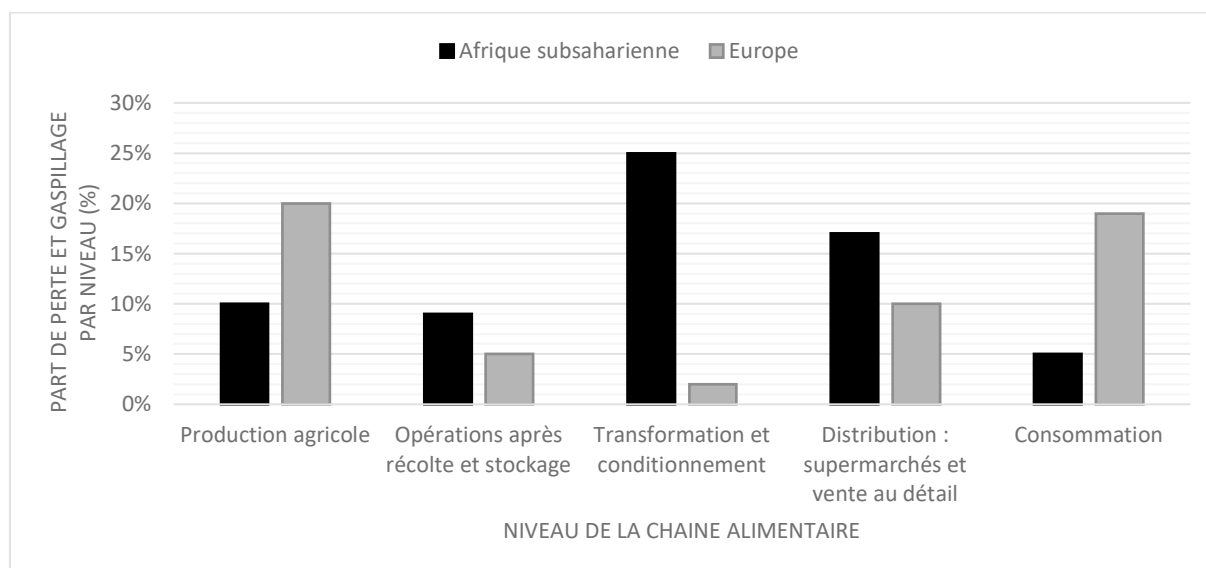


Figure 1 : Part de pertes et gaspillage de fruits et légumes par niveau de la chaîne alimentaire en Afrique subsaharienne et en Europe (Gustavsson, 2011). Ces pourcentages correspondent à la diminution de masse d'aliments qui a été certifiée ou estimée à chaque étape de la chaîne de valeur.

En ASS, comme le montre la Figure 1, les PPR de fruits et légumes ont principalement lieu avant qu'ils ne soient achetés par les consommateurs (Bellemare *et al.*, 2017; Sheahan & Barrett, 2017). Ces PPR sont principalement dues à la forte périssabilité des fruits et légumes sous des climats chauds et humides, aux mauvaises conditions dans lesquels ils sont transportés, distribués et commercialisés, à la saisonnalité de leur production et à l'insuffisance des infrastructures de transformation (Gustavsson, 2011) :

- Les pertes pendant le transport sont principalement dues aux mauvaises pratiques (manipulations brutales, surcharge des véhicules, mauvaise gestion de la chaîne du froid, transport en vrac ou dans des emballages inadaptés ; Kitinoja *et al.*, 2011). Elles sont également dues au faible développement et au mauvais état des réseaux routiers d'ASS. Ainsi en 2008, selon Gwilliam *et al.*, (2008), il y avait seulement 204 km de route / 1000 km² (dont 25 % bitumé) en ASS alors que la moyenne mondiale était de 944 km de route / 1000 km² (dont 50 % bitumé). De plus, en moyenne, seuls 46 % des réseaux principaux étaient en bon état alors que 34 % étaient dans un état passable et 20 % étaient en mauvais état. En milieu rural, la majeure partie (47 %) des réseaux ruraux d'ASS était en mauvais état alors que seuls 25 % étaient en bon état. Ce contexte et les mauvaises pratiques expliquent pourquoi les pertes pendant le transport sont particulièrement importantes lorsque les fruits et légumes sont acheminés vers les centres urbains, pendant la saison des pluies et depuis des régions rurales enclavées (Bancal & Tano, 2019).
- Les pertes pendant la distribution et la commercialisation des fruits et légumes sont principalement dues à l'inadaptation des infrastructures de distribution et de commercialisation (surpeuplement et dimensions réduites des marchés ; insuffisance des équipements de refroidissement) et aux mauvaises conditions d'hygiène des marchés (Gustavsson, 2011).
- Du fait de la saisonnalité de leur production, des volumes importants sont jetés car les débouchés ne sont pas suffisants pour absorber les quantités produites pendant le pic de production de la période de récolte. Pendant cette période, les marchés locaux sont saturés en produits frais. Comme l'offre est supérieure à la demande, les prix peuvent

être si bas qu'une partie des fruits n'est pas récoltée et pourrit sur pieds (cas de la mangue en Côte d'Ivoire par exemple).

- Du fait de l'insuffisance des infrastructures de transformation, le marché des produits frais constitue le principal débouché des fruits et légumes produits localement. De plus, les surplus de production pendant les périodes de récoltes ne peuvent pas être transformés et conservés dans le temps. En ASS, le secteur agroalimentaire se caractérise par le dynamisme des microentreprises artisanales, le lent développement des petites et moyennes entreprises industrielles et de quelques grosses industries. Plutôt que de valoriser la production locale, les grosses industries importent souvent de la matière première (souvent moins chère) et visent les marchés « de masse » (e.g. jus de fruits à base de pulpe importée). Par contre, les petites et moyennes entreprises industrielles transforment les produits locaux pour répondre à la demande urbaine en produits traditionnels. Elles sont souvent situées en milieu urbain ou à la périphérie des villes pour bénéficier de l'accès à l'électricité. Les opérations unitaires qu'elles mettent en œuvre sont généralement réalisées manuellement ou à l'aide d'équipements simples et de petite capacité (Broutin & Bricas, 2006; Broutin & François, 2018). Au niveau des transformateurs, des pertes sont générées au moment du tri lorsque la qualité des fruits et légumes n'est pas suffisante. Les pertes peuvent également être dues à des interruptions dans les opérations de transformation du fait de pannes matérielles ou de coupures d'eau et/ou d'électricité (Gustavsson, 2011).

Plusieurs contraintes expliquent pourquoi les petites et moyennes entreprises de transformation agroalimentaire sont si peu développées en ASS (Bancal & Tano, 2019; Broutin *et al.*, 2012; Gustavsson, 2011):

- Les équipements et les technologies de transformation adaptées au contexte ne sont pas disponibles localement.
- Le montant des investissements dans les unités de transformation sont importants mais l'accès aux financements bancaires est limité.
- Comme la période pendant laquelle les unités de transformation peuvent être utilisées (et donc amorties) est limitée par la saisonnalité des récoltes, il est difficile pour les unités de transformation locales d'être économiquement viables.
- Comme l'industrie de l'emballage est encore peu développée localement, les emballages sont peu disponibles et très onéreux. Leur importation dans des containers nécessite des capacités financières dont ne disposent pas la plupart des petites et moyennes entreprises.
- La main d'œuvre formée et qualifiée est manquante.
- Du fait de la saisonnalité et de l'atomisation de la production de fruits et légumes d'une part, et des contraintes liées au transport d'autre part, il est difficile pour les petites et moyennes entreprises agroalimentaires d'assurer un approvisionnement en fruits et légumes qui soit régulier en qualité et en quantités.
- La commercialisation des produits finis est complexe du fait des habitudes de consommation locales qui comptent peu de produits transformés à base de fruits et légumes. De plus, il est difficile d'accéder aux réseaux de distribution tels que les supermarchés. Enfin, ces entreprises doivent faire face à la concurrence des produits importés et des produits commercialisés par les grosses industries agroalimentaires locales.

1.2. Contexte du cas d'étude : la Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, les problématiques de développement sont similaires à celles évoquées de façon générale pour l'ASS :

- En raison du faible développement et du mauvais état du réseau routier (AGEROUTE, 2019), l'accès aux zones de production agricole est difficile, en particulier pendant la saison des pluies (Bancal & Tano, 2019).
- Le secteur de la transformation agroalimentaire est peu développé. Alors qu'une petite partie des fruits est transformée en jus et en conserves par quelques entreprises ivoiriennes, les légumes sont très peu transformés (seulement 1 % des quantités produites). La principale voie de transformation des légumes est le séchage (piment, gombo et aubergine). Les purées et concentrés de tomate sont principalement importés. Sur le marché, il existe des légumes transformés sous forme de sauces (tomate, gombo, aubergine) prêtes à l'emploi. Comme pour le reste de l'ASS, le secteur agroalimentaire ivoirien est surtout composé de microentreprises artisanales et de petites et moyennes entreprises industrielles essentiellement localisées en milieu urbain ou péri-urbain. Les unités sont souvent polyvalentes et peuvent transformer plusieurs types de matières premières. Les équipements sont rudimentaires et sont parfois loués. Faute d'accès aux financements bancaires, ces entreprises financent souvent leur croissance sur fonds propres (Bancal & Tano, 2019).

Tableau 1 : Superficies récoltées et quantités produites pour les principaux fruits et légumes cultivés en Côte d'Ivoire en 2019 (FAOSTAT, 2021)

Fruits et légumes	Superficie récoltée (ha)	Production (tonnes)
Piments	32 032	202 810
Gombo	54 061	152 325
Aubergines	20 491	103 757
Tomates, fraîches	3 601	37 351
Mangues, mangoustans et goyaves	163 059	98 613
Oranges	3 148	41 618
Ananas	699	41 151

La Côte d'Ivoire est un pays assez représentatif des autres pays d'ASS du fait des zones agro-écologiques rencontrées (forêt humide dans la moitié sud, savanes arborées dans la moitié nord) et des variétés de fruits et légumes cultivés (cf. Tableau 1). Les fruits et légumes disponibles varient selon les bassins de production et selon les saisons. D'après Bancal & Tano (2019), les produits maraîchers sont abondants sur les marchés à la fin de la saison des pluies (d'août à octobre) mais moins disponibles pendant la saison sèche (décembre à février). La Figure 2 présente un aperçu général et simplifié des principales zones de production de fruits et légumes d'intérêt et des périodes pendant lesquelles ils sont disponibles. Elle montre que les zones géographiques dans lesquelles les fruits et légumes sont cultivés et les périodes de l'année pendant lesquels ils sont récoltés diffèrent :

- Dans le Nord de la Côte d'Ivoire, il existe d'importants surplus de production de mangues et de pomme cajou. La mangue est principalement consommée en frais, sur le marché local ou à l'export. En raison de l'augmentation du risque de contamination des mangues par la mouche du fruit à mesure que la saison de la mangue avance, les usines qui trient, conditionnent et exportent des mangues fraîches ne fonctionnent qu'environ 40 jours par an (de mi-mars à mi-mai). Comme ces entreprises n'utilisent

leurs infrastructures qu'une petite partie de l'année seulement, elles cherchent à diversifier leur production. L'anacardier est cultivé pour sa noix (la noix de cajou) mais la pomme qui la supporte n'est aujourd'hui pas transformée. Pourtant, des travaux ont montré qu'il était possible d'en extraire un jus riche en vitamine C (Akinwale, 2000). La pomme est mature lorsque la noix de cajou est récoltée (entre mi-décembre et mi-mars). Dans cette région de la Côte d'Ivoire, un maraichage de contre-saison est pratiqué. Il permet d'approvisionner les marchés urbains en légumes frais pendant la saison sèche (de novembre à février) (Bancal & Tano, 2019).

- Dans la moitié sud de la Côte d'Ivoire, le gombo et l'aubergine font partie des légumes pour lesquels il existe d'importants surplus de production à la fin de la saison des pluies (de mi-août à mi-octobre). Du piment et de la tomate sont également produits dans cette région à la même période, mais le potentiel de transformation du piment est faible et le marché de la tomate transformée est très concurrentiel (présence de nombreux produits importés; Bancal & Tano, 2019). Le long de la côte et dans l'Est du pays, de l'ananas est produit toute l'année, mais les quantités récoltées à la fin de la saison des pluies-début de la saison sèche (mi-août à mi-février) sont plus importantes. D'autres fruits tels que l'orange, le fruit de la passion et la goyave sont produits dans cette région mais la production est atomisée. Dans cette zone, il est important de préciser que des acteurs locaux (coopératives de producteurs, négociants de cacao) voient dans la transformation des fruits et légumes une opportunité pour augmenter les débouchés et les revenus des producteurs.

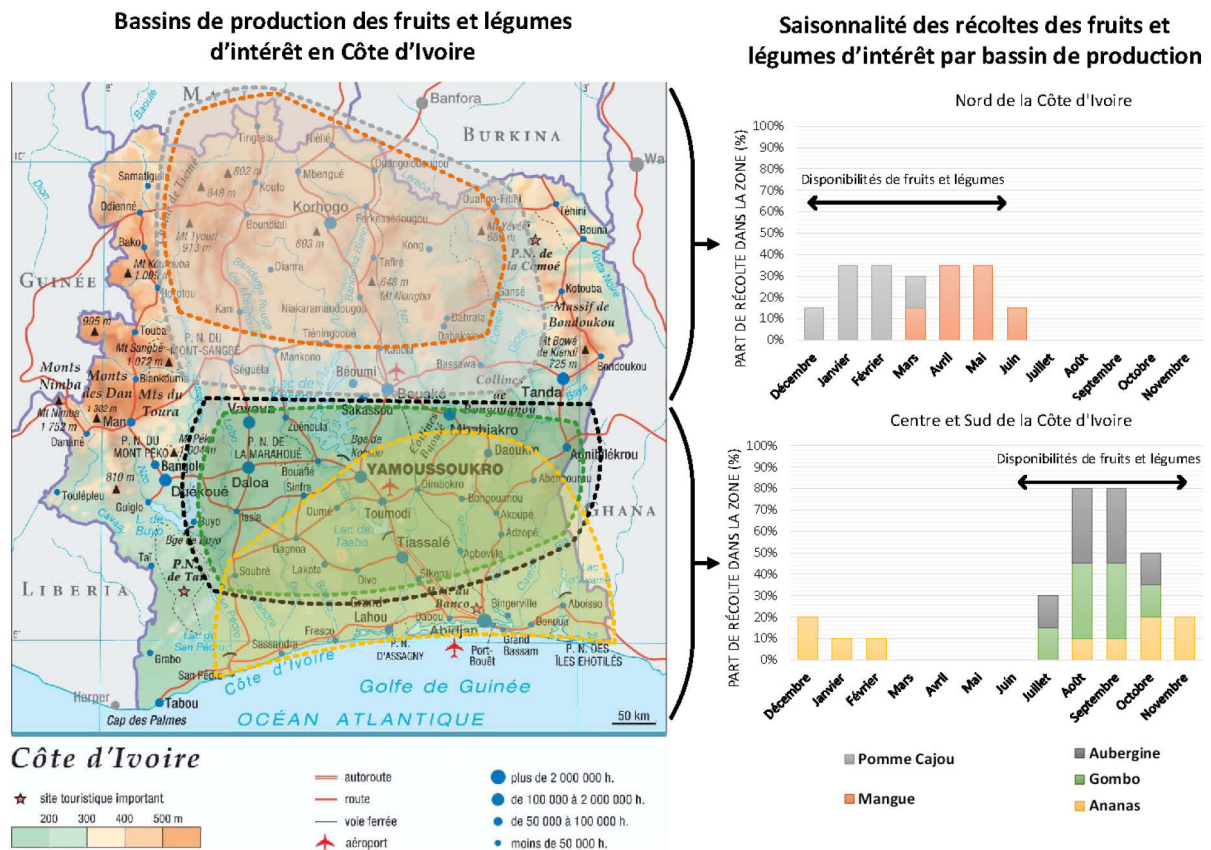


Figure 2 : Aperçu général et simplifié de la localisation des bassins de production des fruits et légumes d'intérêts et de la saisonnalité des récoltes en Côte d'Ivoire (figure réalisée à partir de la carte de Côte d'Ivoire du Larousse).

1.3. Solution à concevoir : l'unité mobile de transformation de fruits et légumes

Compte tenu des complémentarités géographiques et saisonnières entre les bassins de productions et les périodes de récoltes (Figure 2), une UMT de fruits et légumes pourrait constituer une réponse adaptée aux problématiques décrites (importantes PPR de fruits et légumes, manque d'infrastructures et faible développement de l'agroalimentaire). Ce type d'unité figure parmi les solutions évoquées récemment par la FAO (2020) pour augmenter la transformation alimentaire dans les zones enclavées et réduire les PPR. En Europe et au Mexique, les unités mobiles de transformation ont fait l'objet de travaux récents (Moller *et al.*, 2020 et Aguilar Voza, 2020). D'après Marcotte & Montreuil (2016), les modules de production "plug-and-play", reconfigurables, modulaires, mobiles et conteneurisés présentent de nombreux avantages. Dans le contexte de la Côte d'Ivoire et de l'ASS en général, les avantages d'une UMT de fruits et légumes seraient les suivants:

- Costa & Delgado (2019) ont montré que le déplacement d'UMT d'un bassin de production à un autre, en fonction des calendriers de récolte, constitue une solution prometteuse pour réduire les pertes post-récolte. En effet, ce type d'unité permet de transformer des matières premières agricoles au plus près des producteurs, malgré l'enclavement et le manque d'infrastructures dans les zones de production.
- En termes de logistique, en permettant de déplacer et d'installer les UMT au sein des zones de production, la mobilité raccourcit les distances parcourues par les matières premières périssables et diminue les pertes dues aux mauvaises conditions de transport (Aguilar Voza, 2020). La proximité avec les producteurs permet de faciliter la gestion des approvisionnements et d'en sécuriser la qualité et les quantités. Enfin, plutôt que de transporter sur de longues distances des matières premières dont une partie n'est pas directement valorisable (peaux, noyaux), la transformation mobile permet de transporter uniquement ce qui a de la valeur (produits finis, emballages et équipements).
- D'un point de vue économique, comme la mobilité facilite l'exploitation de la complémentarité géographique et saisonnière entre les périodes de récoltes et les bassins de productions, elle favorise l'utilisation des équipements de transformation pendant une grande partie de l'année (plutôt que pendant une courte période de récolte). Par conséquent, elle permet d'augmenter le volume de production par rapport auquel le coût d'investissement des équipements peut être amorti et rentabilisé.
- Pour les acteurs locaux (centres de conditionnement de mangue, coopératives de producteurs, transformateurs semi-industriels) qui souhaitent transformer la production locale et saisonnière de fruits et légumes, une UMT facilite l'accès à des technologies de transformation adaptées. Ce type d'unité est d'autant plus intéressant qu'une partie d'entre eux dispose déjà d'infrastructures, d'un savoir-faire et de capacités logistiques et financières. Enfin, grâce à la conteneurisation, à la mobilité et au caractère « plug-and-play » d'une UMT, il est possible de leur louer temporairement (pendant un à plusieurs mois) une unité de transformation « clés en mains » et de réduire les risques liés à l'installation et la mise en route d'équipements de transformation sur lieu de production.

En plus d'assurer sa viabilité économique et de garantir la qualité de ses produits finis, la conception d'une UMT adaptée doit prendre en compte plusieurs contraintes spécifiques :

- Les fruits et légumes disponibles localement (mangue, ananas, fruit de la passion, goyave, aubergine, gombo, tomate etc.) peuvent être transformés en différents types de produits finis (purées, nectars, coulis, jus) et conditionnés dans différents types

d'emballages (boîte de conserve en fer blanc, bouteille en verre ou emballage souple). Par conséquent, un certain niveau de polyvalence est nécessaire.

- Comme la conteneurisation d'une UMT contraint l'espace au sol disponible pour implanter et opérer les équipements de transformation, les équipements contenus dans l'UMT doivent pouvoir être ajoutés, ré-agencés et/ou déplacés hors du container, en fonction de la matière première et du produit fini. Pour cela, les équipements discontinus sont mieux adaptés et doivent donc être privilégiés.
- Comme le déplacement et l'installation de ce type d'unité dans des zones enclavées entraîne des contraintes importantes vis-à-vis des utilités disponibles (eau et électricité notamment), un certain niveau d'autonomie est nécessaire et leur consommation doit être la plus efficiente possible.
- Comme le niveau de compétence technique des opérateurs locaux est assez faible, les équipements de l'UMT doivent être simples d'utilisation et robustes. De plus, ils doivent pouvoir être maintenus et réparés localement (Bancal & Tano, 2019; Kitinoja *et al.*, 2011) pour que l'UMT soit pérenne.

La conception d'une UMT qui remplisse au mieux tous les objectifs de conception qui lui sont fixés est un travail complexe qui nécessite la mise en œuvre d'une méthodologie adaptée.

2. Méthodes de conception existantes

2.1. La conception intégrée et multi-échelle d'ateliers discontinus

Les usines de transformation discontinues présentent l'avantage d'être plus flexibles que les usines continues. En effet, pour changer leur production (matières premières, produits finis, recettes et/ou capacité), il est souvent facile de les reconfigurer et/ou de modifier les conditions de fonctionnement des équipements qui les composent (Barbosa-Póvoa, 2007; Moreno et Montagna, 2007). Cependant, en génie des procédés alimentaires, peu d'études se concentrent sur la conception d'usines discontinues. Les travaux de Moreno et Montagna (2007) et de Simpson *et al.* (2003) font partie des rares études disponibles à ce sujet. En génie chimique, les études menées sur ce sujet ont montré qu'il s'agit d'un problème très complexe qui nécessite l'utilisation de méthodes de simulation et d'optimisation avancées (Barbosa-Póvoa, 2007; Dietz *et al.*, 2005, 2006) et qu'une approche de conception intégrée peut être pertinente (Koller *et al.*, 2018; Rossi *et al.*, 2017; Vega *et al.*, 2014).

La conception intégrée d'ateliers de transformation consiste à prendre simultanément en compte i) les éléments que le concepteur doit définir lors de la conception de l'atelier (*e.g.* choix des types et des modèles d'équipement, de leur nombre, de leur capacité, etc.) et ii) les conditions d'exploitation de l'atelier (*e.g.* choix des conditions opératoires et de l'ordonnancement de la production) (Baldea et Harjunoski, 2014; Dimian *et al.*, 2014; Patil *et al.*, 2015). Pour cela, elle nécessite de modéliser, simuler et optimiser ensemble les différents niveaux fonctionnels de l'atelier de transformation (opération unitaire, procédé, atelier). Cette tâche est complexe car les modèles et outils de simulation qui ont été développés pour décrire les phénomènes qui se produisent à ces différents niveaux (*e.g.* transformations physico-chimiques, microbiologiques et organoleptiques de l'aliment pendant l'opération unitaire, flux de matières pendant le procédé, flux économiques dans l'atelier ; *cf.* Figure 3) ont souvent des échelles de temps et/ou de longueur qui sont différentes (Baldea & Harjunoski, 2014). Cela complexifie la modélisation, la simulation et l'optimisation du système atelier. Pour résoudre cette difficulté, les méthodes et les stratégies de modélisation et de conception de systèmes multi-échelle qui ont été développées dans d'autres domaines de recherche (Ingram *et al.*, 2004; Panchal *et al.*, 2005; Yang & Marquardt, 2009) peuvent être utilisées. Ces méthodes ont l'avantage d'offrir une plus grande flexibilité pour configurer et optimiser les performances et

la durabilité des systèmes à concevoir (Martinez-Hernandez, 2017). Leur mise en œuvre nécessite que des modèles de simulation soient disponibles à chaque échelle (Panchal *et al.*, 2005).

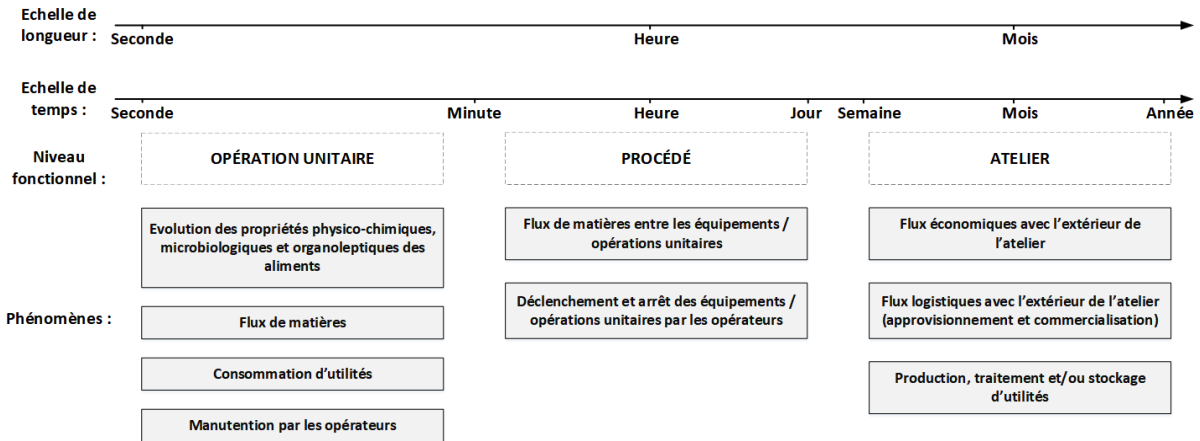


Figure 3 : Echelles de longueur et de temps caractéristiques correspondant aux niveaux fonctionnels et phénomènes d'un atelier de transformation alimentaire

Même si en génie des procédés alimentaires, les méthodes de modélisation et de conception multi-échelle sont relativement nouvelles (Ho *et al.*, 2013), de nombreux modèles de simulation ont été développés indépendamment et sont disponibles dans la littérature. Au niveau de l'opération unitaire, des modèles et des outils de modélisation multi-physique permettent de décrire et simuler l'évolution de la qualité d'un aliment en fonction des équipements et des conditions opératoires (Bimbenet *et al.*, 2017; Datta, 2008, 2016; Jiménez *et al.*, 2020; Trystram, 2012). Au niveau du procédé, les outils de simulation par événements discrets ont montré leur intérêt pour décrire les flux de matière au sein d'une ligne de production, résoudre des problèmes d'ordonnancement et prédire les performances de lignes complètes d'équipements de transformation (Dietz *et al.*, 2005; Jahangirian *et al.*, 2010; Penazzi *et al.*, 2017) et/ou pour générer le cahier des charges d'une ligne de production (Johansson *et al.*, 2009). Enfin, des modèles existent pour prédire la consommation d'eau et d'énergie, la production de déchets (Duret *et al.*, 2020; Olajire, 2020) et/ou les performances technico-économiques (e.g. Leung Pah Hang *et al.*, 2016; Marouli & Maroulis, 2005; Vargas-Bautista *et al.*, 2017) au niveau d'un système de production/transformation.

2.2. La conception multi-objectif en génie des procédés alimentaires

La conception d'une usine de transformation alimentaire est intrinsèquement un problème multi-objectif. Mais à notre connaissance, contrairement à ce qui a été fait en génie chimique (e.g. Dietz *et al.*, 2006), les méthodes d'optimisation multi-objectifs (MOOM) n'ont jamais été utilisées pour concevoir un atelier de transformation alimentaire. En génie des procédés alimentaires, les MOOM ont souvent été utilisées au niveau de l'opération unitaire (e.g. Abimbola M Enitan, 2011; Asgari *et al.*, 2017; Raffray *et al.*, 2015), et l'ont été plus rarement au niveau du procédé (e.g. Deka et Datta, 2017; Romdhana *et al.*, 2016). Cependant, la plupart de ces études n'utilisaient que partiellement les éléments constitutifs des MOOM. En effet, pour être complète, une méthode d'optimisation multi-objectifs nécessite de définir et d'implémenter ensemble i) des objectifs de conception associés à des indicateurs de performance, ii) un modèle de simulation du système à concevoir, iii) des modèles de préférence, iv) une méthode de sélection et, v) un algorithme d'optimisation (Madoumier *et al.*, 2019).

La méthode Observation, Interprétation et Agrégation (OIA), qui est basée sur l'ontologie de conception Fonction-Comportement-Structure de Gero & Kannengiesser (2014), rassemble tous les éléments requis d'une MOOM. En génie des procédés alimentaire, elle a été utilisée en combinaison avec un algorithme génétique par Quirante (2012), Raffray (2014), et Rivier (2017) pour concevoir des équipements de transformation alimentaire. Cette méthode peut être adaptée à d'autres problèmes et domaines d'application.

L'étude de la littérature montre que de nombreuses méthodes ont été développées et appliquées indépendamment les unes des autres pour concevoir des systèmes complexes. En génie chimique, plusieurs d'entre elles ont été combinées pour concevoir des usines discontinues dans une perspective d'optimisation multi-objectifs. Mais, à notre connaissance, en génie des procédés alimentaires, aucune recherche n'a examiné comment les méthodes de conception multi-échelle et les MOOM pourraient être utilisées ensemble, au sein d'une méthodologie globale, pour effectuer la conception intégrée d'ateliers discontinus de transformation.

3. La problématique spécifique du gombo

3.1. Fruits et légumes que l'UMT doit pouvoir transformer

L'UMT doit être capable de transformer la mangue, l'ananas et le gombo. En effet, ces 3 fruits et légumes sont assez représentatifs des types de produits finis (purée, nectar et jus de fruit, purée de légume) et des voies d'extraction (broyage, raffinage et/ou pressage) et de stabilisation thermique (pasteurisation ou stérilisation) possibles pour les différents fruits et légumes disponibles localement. Il est à noter que les indicateurs de qualité sensorielle et nutritionnelle (apparence, texture et teneur en nutriments) qui permettent de suivre leur qualité sont assez différents :

- Lors de la transformation de la mangue, la dégradation des caroténoïdes doit être limitée afin de préserver la couleur et la qualité nutritionnelle des purées (Vásquez-Caicedo *et al.*, 2007). Les cinétiques de dégradation des caroténoïdes ont par exemple été étudiées par (Ahmed *et al.*, 2002).
- Pendant le traitement thermique, la dégradation de la couleur du jus d'ananas qui est causée par le brunissement non enzymatique et la destruction des pigments qu'il contient doit être maîtrisée (Chutintrasri & Noomhorm, 2007; Rattanathanalerk *et al.*, 2005). La différence totale de couleur (TCD aussi notée ΔE) est un indicateur de qualité qui permet de mesurer l'ampleur de la différence de couleur qui est perçue par le consommateur (Pathare *et al.*, 2013). Les cinétiques de dégradation pour cet indicateur sont connues (Rattanathanalerk *et al.*, 2005).
- La texture gluante du gombo est le principal indicateur de qualité qui est recherché par les consommateurs africains lorsqu'ils consomment ce légume (Inyang et Ike, 1998; Uzo et Ojiako, 1980). Mais la dégradation de cette propriété au cours des procédés de conservation freine la consommation de ce légume sous forme stabilisée (Aworh *et al.*, 1980; Olorunda & Tung, 1977). A notre connaissance, la dégradation de cet indicateur de qualité au cours du traitement thermique n'a jamais été étudiée.

3.2. Ingrédients des sauces gluantes et critères de qualité recherchés

Le gombo (*Abelmoschus esculentus*) est un légume vert très apprécié en Afrique de l'Ouest et Centrale. Avec le piment et l'aubergine, il fait partie des légumes les plus cultivés (cf. Tableau 1) et les plus consommés en Côte d'Ivoire. Lorsqu'il est frais, il peut être broyé, ou bien coupé en dés ou en lamelles, avant d'être introduit en fin de cuisson dans la sauce à

laquelle il donne son nom. S'il n'est pas consommé rapidement, le gombo frais se déshydrate, durcit et devient fibreux. Il peut alors être séché à l'air libre ou au soleil avant d'être réduit en poudre. Sous cette forme, il entre dans la recette de la sauce djoumlé. Avec la sauce aubergine et la sauce graine, ces sauces font partie des sauces traditionnelles les plus consommées en Côte d'Ivoire (Bancal & Tano, 2019).

Comme les amandes du fruit d'*Irvingia gabonensis* (Mateus-Reguengo *et al.*, 2019; Ndjouenkeu *et al.*, 1996), l'écorce de *Triumfetta cordifolia* (Woguia *et al.*, 2012) et les feuilles d'*Adansonia digitata* (Woolfe *et al.*, 1977) et de *Corchorus olitorius* (Bedigian, 2004; Dansi *et al.*, 2008), le gombo fait partie des ingrédients utilisés dans la cuisine traditionnelle africaine en raison de la consistance particulière qu'ils confèrent aux sauces, soupes et ragouts (Kouebou *et al.*, 2013). D'un point de vue sensoriel, les consommateurs d'Afrique subsaharienne utilisent les adjectifs « gluants », « filant », « étirable », « mucilagineux », « visqueux », « épais », « *smooth* » et « *glue* » pour qualifier la texture de ces sauces (Falade et Omojola, 2010; Fasogbon *et al.*, 2017; Owoye *et al.*, 1990; Woolfe *et al.*, 1977). Pour eux, ce sont les propriétés gluantes du gombo qui constituent le principal critère de qualité de ce légume (Inyang et Ike, 1998; Uzo et Ojiako, 1980).

En plus de donner du goût, les sauces gluantes ont pour fonction de faciliter l'ingestion des pâtes amyliées qu'elles accompagnent (foutou, ugali, tô, etc.). Lorsqu'elles sont consommées seules, ces pâtes sont souvent sèches, collantes, compactes, lourdes et difficiles à avaler (Makame *et al.*, 2019). Avant d'être mise en bouche, chaque boulette de pâte est donc trempée à la main dans une sauce gluante, afin que celle-ci la rende « glissante » et facile à déglutir (Bedigian, 2004; Kala-Lobe, 1976; Roulon-Doko, 1996). La consommation du repas à la main induit que l'autre valeur technique des sauces gluantes est leur épaisseur : une sauce ne devant être ni « trop compacte » ni « trop liquide » (Roulon-Doko, 1996). En plus d'une évaluation « au toucher », l'appréciation de la qualité texturale des sauces gluantes est également visuelle : la sauce doit avoir la capacité de s'allonger et de filer (Fasogbon *et al.*, 2017; Leakey *et al.*, 2005; Roulon-Doko, 1996).

3.3. Composition du gombo et propriétés rhéologiques de son mucilage

Le gombo frais contient environ 11% de matière sèche. Il est composée de polysides (66%), de protéines (23%), de lipides (2%) et de minéraux (9% ; Inyang & Ike, 1998). A notre connaissance, aucune étude n'a caractérisé les propriétés rhéologiques et texturales des sauces gombo. Par contre, de nombreux travaux se sont intéressés aux propriétés rhéologiques de polysides de gombo. En plus de leur caractère gluant, ceux-ci présentent des propriétés épaississantes, rhéofluidifiantes, viscoélastiques (Kontogiorgos *et al.*, 2012; Ndjouenkeu *et al.*, 1996; Sengkhamparn *et al.*, 2010), émulsifiantes (Alba *et al.*, 2013, 2016), élongationnelles (Yuan *et al.*, 2018) et floculantes (Freitas *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2015) originales. A l'exception des protocoles d'extractions à l'eau utilisés par (Dimopoulou *et al.*, 2016; Temenouga *et al.*, 2016) et (Yuan *et al.*, 2018), les protocoles utilisés pour obtenir des extraits de gombo (Alba *et al.*, 2015; J. J. Meister *et al.*, 1983; Ndjouenkeu *et al.*, 1996; Sengkhamparn *et al.*, 2009a; Woolfe *et al.*, 1977) s'éloignent fortement de ce que peut subir le gombo lorsqu'il est cuisiné en sauce (utilisation de solvants). Comme le mucilage est une matrice moins complexe que les sauces gombo, les propriétés rhéologiques des sauces gombo diffèrent probablement de celles décrites pour les extraits et le mucilage.

D'après Ritzoulis (2017), les propriétés rhéologiques et texturales du mucilage de gombo sont la résultante d'interactions complexes entre les différentes populations de macromolécules qui composent celui-ci. Parmi les différents polysides contenus dans le mucilage de gombo (Sengkhamparn *et al.*, 2009a), de nombreux travaux se sont intéressés à

ses pectines très spécifiques (faiblement méthylées, fortement acétylées et plus ou moins ramifiées) qu'il contient (Alba *et al.*, 2015; Kpodo *et al.*, 2017; Sengkhamparn *et al.*, 2009b) et qui diffèrent selon les génotypes (Kpodo *et al.*, 2018). En phase aqueuse, les molécules du mucilage se libèrent et s'auto-assemblent les unes avec les autres pour former un réseau plus ou moins dense (Alba *et al.*, 2017; Lousinian *et al.*, 2017; Ritzoulis, 2017). De nombreuses études ont montré que la rhéologie du mucilage de gombo dépend fortement de la force ionique, du pH, de la présence de cations divalents et de la concentration en polyosides dans le milieu (J. J. Meister *et al.*, 1983; Kontogiorgos *et al.*, 2012; Ndjouenkeu *et al.*, 1996; Woolfe *et al.*, 1977; Yuan *et al.*, 2018). En effet, les conditions du milieu influent fortement sur la charge des pectines (Alba *et al.*, 2015), leur solubilité (Ghori *et al.*, 2017), la flexibilité des chaînes pectiques et leur conformation spatiale en solution (Alba *et al.*, 2017). De plus, en influençant la complexité et l'intensité des interactions intra et intermoléculaires, la concentration en extraits de gombo dans le mucilage influe sur sa relaxation (Kontogiorgos *et al.*, 2012; Yuan *et al.*, 2018).

3.4. Effets du procédé sur la qualité du gombo

Comme le gombo se dégrade rapidement à température ambiante, un procédé de stabilisation doit être appliqué pour qu'il se conserve dans le temps. Beaucoup de travaux se sont donc intéressés à l'impact du procédé et de la formulation sur la qualité du gombo ou de son mucilage. Les critères de qualité qui ont été étudiés sont :

- La couleur du gombo entier (Aworh *et al.*, 1980), broyé (Inyang & Ike, 1998) ou transformé (Falade & Omojola, 2010),
- La viscosité du mucilage (Falade & Omojola, 2010; Inyang & Ike, 1998; Owoeye *et al.*, 1990; Woolfe *et al.*, 1977) ou de purées de gombo (Olorunda & Tung, 1977),
- L'acceptabilité sensorielle du gombo cuisiné (Aworh *et al.*, 1980; Falade & Omojola, 2010),
- La qualité nutritionnelle du gombo (Aworh *et al.*, 1980; Falade & Omojola, 2010; Inyang & Ike, 1998)
- La digestibilité *in vitro* de composés d'intérêts lorsqu'il est préparé en sauce (Avallone *et al.*, 2007).

Les études s'étant intéressées à l'impact du procédé aux propriétés texturales de ce légume se sont focalisées sur la viscosité (dynamique, cinématique ou relative) de la sauce et du mucilage de gombo. Elles ont montré que les propriétés visqueuses du gombo sont dégradées par la congélation (Falade & Omojola, 2010; Olorunda & Tung, 1977), le séchage (Falade & Omojola, 2010; Inyang & Ike, 1998), le blanchiment (Aworh *et al.*, 1980; Inyang & Ike, 1998) et la cuisson (Woolfe *et al.*, 1977). Ces effets des procédés de conservation sur les propriétés rhéologiques et texturales du gombo sont un frein majeur à la consommation de ce légume sous forme stabilisée en Afrique (Aworh *et al.*, 1980; Olorunda & Tung, 1977). Il est donc nécessaire de rechercher comment préserver au mieux la qualité texturale du gombo pendant le procédé de conservation.

3.5. La texture gluante : définitions et mesures instrumentales

Afin de pouvoir conserver au mieux les propriétés gluantes lors du procédé, il est nécessaire de disposer de méthodes de mesures instrumentales pour suivre son évolution au cours du procédé. Cependant, il n'existe pas de norme internationale associée au concept de gluant (AFNOR, 2009). Comme le montrent les différentes définitions trouvées dans la littérature (Tableau 12 du Chapitre 3), il n'existe aucune définition claire de ce descripteur de texture. La définition utilisée par Szczesniak et Farkas (1962) renvoie à une notion d'épaisseur (« *thick* »), celle d'Uzo et Ojiako (1980) renvoie à la notion d'adhérence (« *sticky* ») et celle d'Aziz *et al.*

(2017) renvoie à des propriétés élongationnelles (« *drawability* »). Pour leur part, Weenen *et al.* (2003) définissent la notion de collant en faisant référence à des filaments gluants (« *slimy strings* »). Enfin, pour Terpstra (2008) la sensation de gluant en bouche est définie comme une combinaison entre l'épaisseur (« *thicky* »), les propriétés élongationnelles (« *stringy saliva* ») et l'adhérence (« *sticking together* ») d'un aliment en bouche. Surtout, le fait que les définitions de Szczesniak et Farkas, (1962), Terpstra (2008) et Weenen *et al.* (2003) associent la notion de gluant avec la difficulté de déglutition (« *difficult to swallow* ») n'est pas cohérent avec le fait que pour les consommateurs africains, l'une des fonctions des sauces gluantes est de faciliter la déglutition des pâtes amylacées qu'elles accompagnent (Owoeye *et al.*, 1990).

Les résultats des rares études qui se sont intéressées à la mesure instrumentale de la texture gluante des aliments sont parfois contradictoires et ne font apparaître aucune tendance claire et cohérente quant à la possibilité de mesurer instrumentalement la perception sensorielle de cette texture. D'une part, Terpstra *et al.* (2009) n'ont pas trouvé de mesure instrumentale qui soit bien corrélée à la perception sensorielle du « *slimy afterfeel* ». D'autre part, alors que pour Szczesniak et Farkas (1962) et Wood (1974), la perception du gluant en bouche est corrélé aux propriétés rhéofluidifiantes d'un aliment, pour Richardson *et al.* (1989) et Uzo et Ojiako (1980) elle est corrélée à la viscosité (dynamique et cinématique respectivement). Mais, à elles seules, les mesures des propriétés visqueuses d'un aliment ne semblent pas suffisantes pour estimer le niveau de gluant. En effet, la viscosité est une propriété rhéologique complètement différente des propriétés élongationnelles utilisées par les consommateurs africains pour évaluer la texture d'une sauce gluante (Aworh *et al.*, 1980; Fasogbon *et al.*, 2017; Leakey *et al.*, 2005; Roulon-Doko, 1996).

D'un point de vue rhéologique, Zhu et Mizunuma (2017) et Yuan *et al.* (2018) ont montré que le mucilage de gombo avait de remarquables propriétés élongationnelles. Selon van Vliet (2002), c'est probablement une combinaison de facteurs qui détermine le niveau de gluant. D'après Yuan *et al.* (2018), la combinaison des mesure de la viscosité de cisaillement et de la viscosité élongationnelle permettrait de décrire les propriétés mécaniques originales du gombo. D'un point de vue textural, il existe des mesures instrumentales qui permettent de prédire l'appréciation du filant au toucher (Gilbert *et al.*, 2013).

Afin de pouvoir minimiser la dégradation de la texture gluante du gombo au cours du procédé de conservation, il apparait donc nécessaire d'identifier au préalable une méthode de mesure instrumentale de la texture des sauces gombo qui permette de prédire la perception sensorielle de leur niveau de gluant.

4. Objectifs de l'étude et stratégie de recherche

4.1. Questions de recherche et objectifs de l'étude

Le principal objectif de cette étude est de concevoir une unité mobile de transformation de fruits et légumes qui remplisse les 8 objectifs de conception suivants:

- 1) Etre déplaçable au sein des zones de production enclavées,
- 2) Etre flexible quant aux types de fruits et légumes et de produits finis qu'elle permet de transformer,
- 3) Etre viable économiquement pour ses utilisateurs,
- 4) Garantir la qualité sanitaire, organoleptique et nutritionnelle des produits finis,
- 5) Etre opérable dans des zones enclavées malgré l'accès contraint aux utilités,
- 6) Etre ergonomique d'utilisation malgré l'espace limité à l'intérieur du container qui la contient,

- 7) Permettre une utilisation efficace des utilités disponibles,
- 8) Etre assemblable et maintenable localement.

Cependant, concevoir une UMT qui remplisse au mieux ces 8 objectifs est un travail complexe qui nécessite d'utiliser des méthodes de simulation et d'optimisation avancées.

Par conséquent, **le second objectif de cette étude est de montrer et d'illustrer comment les méthodes de modélisation multi-échelle et de conception multi-objectif peuvent être combinées, au sein d'une méthodologie globale, pour optimiser la conception d'un atelier de transformation alimentaire.**

La qualité sanitaire, organoleptique et nutritionnelle des produits finis dépend fortement des conditions dans lesquelles est effectuée la stabilisation thermique. Pour concevoir l'UMT de façon à ce qu'elle garantisse la qualité des produits finis, il faut disposer de modèles permettant de prédire comment évoluent leur qualité au cours de cette opération unitaire. Dans la littérature, les modèles cinétiques permettant de prédire la dégradation des caroténoïdes dans la purée et le nectar de mangue (Ahmed *et al.*, 2002) et la dégradation de la couleur du jus d'ananas (Rattanathanalerk *et al.*, 2005) au cours du traitement thermique sont disponibles. A notre connaissance, ce n'est pas le cas pour le gombo : la dégradation de sa texture gluante au cours du traitement thermique n'a jamais été étudiée.

Aussi, le troisième objectif de cette étude est d'identifier les paramètres cinétiques permettant de décrire, modéliser et prédire l'évolution de la texture gluante d'une purée de gombo au cours du traitement thermique.

Pour cela, il est indispensable de disposer d'une méthode de mesure instrumentale qui permette (i) de caractériser et suivre l'évolution des propriétés rhéologiques et texturales du gombo pendant un procédé de transformation ; (ii) de prédire la perception sensorielle du gluant par les consommateurs. Cependant, les rares études qui se sont intéressées à la mesure instrumentale de la texture gluante des aliments n'ont pas permis de clairement déterminer quelle est la méthode de mesure instrumentale la plus adaptée. De plus, la perception sensorielle de la texture gluante est encore mal comprise et définie.

Le quatrième objectif de cette étude est donc d'identifier quelles sont les méthodes de mesure instrumentales qui sont les plus adaptées pour prédire la perception sensorielle de la texture d'une sauce gluante.

4.2. Stratégie de recherche mise en œuvre

La Figure 4 offre une vision globale de la stratégie de recherche qui a été mise en œuvre, et de la structure de ce manuscrit.

Pour atteindre les objectifs de l'étude, nous avons considéré qu'une meilleure connaissance du gombo était un prérequis nécessaire à la modélisation du fonctionnement de l'UMT et à l'optimisation de sa conception. Pour cette raison, le travail de recherche s'est dans un premier temps concentré sur le gombo et un important travail expérimental a été réalisé pour :

- i. Identifier comment mesurer instrumentalement les propriétés rhéologiques et texturales de purées de gombo (action 1, chapitre 2),
- ii. Chercher les méthodes de mesure instrumentale qui étaient les plus adaptées pour prédire la perception sensorielle de la texture gluante (action 2, chapitre 3),
- iii. Suivre la dégradation de la qualité texturale du gombo pendant le traitement thermique (action 3, chapitre 4).

A partir des résultats obtenus, l'opération de stabilisation thermique a été modélisée pour la purée de gombo et les 3 autres produits finis de l'UMT (action 4). Ce modèle a ensuite été

utilisé pour construire l'outil d'aide à la décision destiné à optimiser la conception de l'UMT (actions 6 et 7).

La réflexion méthodologique menée pour optimiser la conception de l'UMT a été formalisée en s'appuyant sur la bibliographie existante et sur l'expérience acquise (chapitre 5). Le chapitre 6 illustrera comment cette méthodologie a été appliquée à la conception de l'unité mobile.

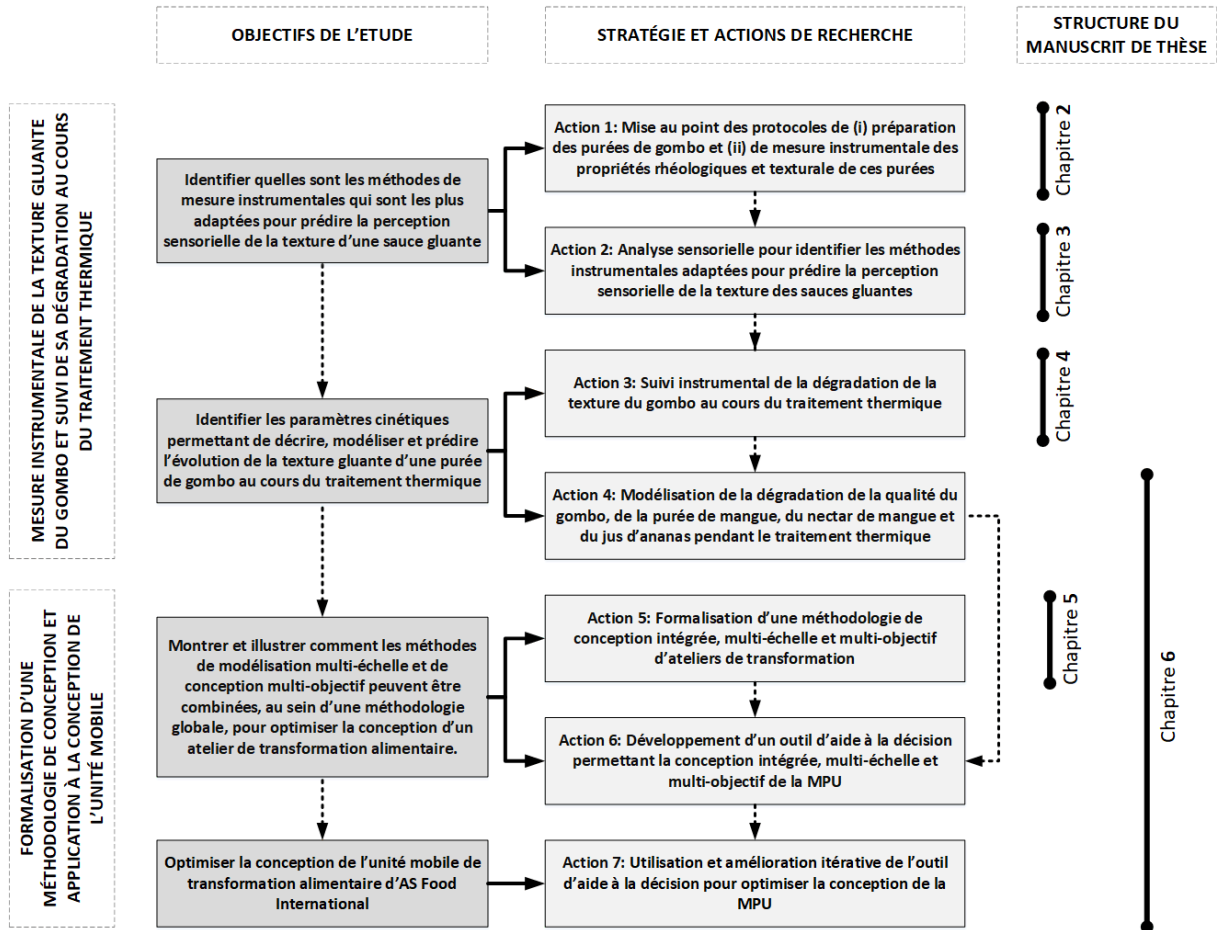


Figure 4 : Stratégie de recherche mise en œuvre pour atteindre les objectifs de l'étude et structure du manuscrit de thèse

Pour concevoir l'UMT d'AS FOOD INTERNATIONAL, nous avons considéré qu'une meilleure connaissance du gombo était un prérequis nécessaire. En effet, l'analyse de la littérature a montré que les propriétés rhéologiques et texturales du gombo sont dégradées par le procédé de conservation (congélation, séchage, blanchiment, cuisson). Or, ces effets des procédés de conservation sur les propriétés gluantes du gombo sont un frein majeur à la consommation de ce légume sous forme stabilisée en Afrique. Il est donc nécessaire de rechercher comment préserver au mieux la qualité texturale du gombo pendant le procédé de conservation. Mais pour cela, il faut disposer de méthodes de mesures instrumentales pour suivre l'évolution des propriétés gluantes de ce légume pendant le procédé. Les rares études qui se sont intéressées à la mesure instrumentale de la texture gluante des aliments ne font apparaître aucune tendance claire et cohérente quant à la possibilité de mesurer instrumentalement la perception sensorielle de cette texture.

Aussi, la première action de recherche de cette étude (cf figure 4) a eu pour but de rechercher les méthodes de mesure instrumentales les plus adaptées pour i) caractériser la texture des sauces gluantes préparées à partir de gombo et ii) suivre son évolution au cours du procédé de conservation.

La stratégie proposée propose de mesurer les propriétés rhéologiques et texturales d'une large gamme d'échantillons de purées et de sauces de gombo en utilisant différentes méthodes expérimentales décrites dans la littérature. Ces méthodes ont ensuite été comparées entre elles afin d'extraire celles qui étaient (i) les plus répétables, discriminantes et (ii) suffisantes pour caractériser les propriétés rhéologiques et texturales des purées de gombo.

Chapitre 2

Chapitre 2: Clustering of instrumental methods to characterize the texture and the rheology of slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) suspensions (Publication n°1)

Timoty SAVOURÉ ^{a,b}, Manuel DORNIER ^b, Laurent VACHOUD ^b, Antoine COLLIGNAN ^{b, *}

^a *AS Food International, Grenoble, France*

^b *Qualisud, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier SupAgro, Université d'Avignon, Université de La Réunion, Montpellier, France.*

* *Corresponding author.*

Publication parue en 2020 dans la revue « Journal of Texture Studies » (Volume 51, Numéro 3, jtxs.12505)

Abstract:

Okra (*Abelmoschus esculentus*) is one of the ingredients widely used in African gastronomy because of the unique slimy texture it gives to sauces. However, processing and formulation can affect the textural and rheological properties of these sauces, leading to unacceptable quality for the African consumer. The aim of this study was to select the instrumental measurements best enabling i) characterization of the rheology and texture of slimy sauces prepared from okra and ii) monitoring its evolution during the preservation process. 37 slimy suspensions (sauces and purées) were measured with 16 rheological and textural parameters. A Principal Component Analysis revealed that flow consistency index K and flow behavior index n were well correlated with visco-elastic, adhesive and shear thinning properties, and that stringiness was well correlated with elongational, cohesive and ductile properties. These two sets of measurement methods are sufficient to characterize their rheological and textural properties, and necessary to discriminate them according to their process and formulation.

Key words:

Okra, Slimy sauces, Stringiness, Structured fluid, Rheology, Texture

1. Introduction

Various plant-origin ingredients are traditionally used in West and Central African cuisine because of the slimy consistency they give to sauces, soups and stews. This is the case of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench), nkui (bark of *Triumfetta pentandra* A. Rich) and dika nut kernels (*Irvingia gabonensis*) (Aubry Lecomte ex O'Rorke) (Kouebou et al., 2013; Mateus-Reguengo et al., 2019; Ndjouenkeu, Goycoolea, Morris, & Akingbala, 1996). For consumers in sub-Saharan Africa, one of the essential functions of slimy sauces is to facilitate the swallowing of the starchy dough they are served with (Owoeye, Caurie, Allagheny, & Onyezili, 1990). For them, the "slimy" properties of okra are its main attribute, and therefore an essential quality criterion (Uzo & Ojiako 1980).

Okra sauces have never undergone rheological and textural characterization, but many studies have focused on the rheological properties of okra extracts (mucilage, polysaccharides and pectins in particular). In addition to their sliminess, they have original thickening, shear thinning, viscoelastic and visco-elastic properties (Kontogiorgos, Margelou, Georgiadis, & Ritzoulis, 2012; Ndjouenkeu et al., 1996; Sengkhamparn et al., 2010), emulsifying properties (Kpodo et al., 2018) and elongational properties (Yuan, Ritzoulis, & Chen, 2018) properties. The rheological properties of okra mucilage are the result of complex interactions between the various macromolecular populations of which it is composed (Ritzoulis, 2017), including very specific pectic compounds (Kpodo et al., 2018).

The textural properties of okra products, including sauces, can be significantly altered by preparation and stabilization processes. Studies that investigated the impact of the process on the textural properties of okra focused on the viscosity (simple, kinematic, relative) of its mucilage or okra sauces. They showed that the viscous properties of the product are degraded by drying (Falade & Omojola, 2010; Inyang & Ike, 1998), blanching (Inyang & Ike, 1998) and cooking (Woolfe, Chaplin, & Otchere, 1977). These effects on the rheological properties of okra are a major obstacle to the conservation of this vegetable before consumption in West Africa. In order to improve the processing conditions of this vegetable, it is therefore essential to have tools that allow the best enabling assessment of its slimy properties.

Only a few old studies took an interest in the instrumental measurement of the slimy texture of food. For Uzo & Ojiako (1980), the perception of the sliminess of a whole okra is correlated with the kinematic viscosity of its mucilage. Other authors have shown correlations between the perception of sliminess in the mouth and the shear thinning (Szczeniak & Farkas, 1962; Wood, 1974) or viscous properties (Richardson et al., 1989) of a food, while some did not find a correlation (Terpstra et al., 2009). As a result, no clear and consistent trend emerges from these sometimes contradictory results. Moreover, measurements of viscous properties alone do not seem sufficient to appraise the quality of slimy sauces, since African consumers base their assessment on their ability to elongate it (Fasogbon, Taiwo, & Adeniran, 2017; Leakey et al., 2005). Finally, for Szczeniak & Farkas (1962), "*a slimy material was defined as one that is thick, coats the mouth, and is difficult to swallow*". But this definition seems to contradict the fact that for African consumers, slimy sauces facilitate swallowing.

In this context, the objective of this study is to select the instrumental measurements best enabling i) characterization of the texture of slimy sauces prepared from okra and ii) monitoring its evolution during the preservation process. The proposed strategy was to measure the rheological and textural properties of a wide range of samples of okra purées and sauces using different experimental methods described in the literature. These methods were then compared with each other to extract the most relevant instrumental parameters.

2. Materials and methods

2.1. Sample generation

In order to obtain slimy suspensions with the greatest possible variety of rheological and textural properties, 37 samples were prepared by varying the formulation and using processes known to have an impact on the texture of okra (Figure 5).

Two batches of fresh okra purée were prepared and frozen. Of these, 36 samples were formulated at different pH and dry matter contents (no.1-31), mixed with other slimy ingredients (no.32-33) or used in a traditional recipe (no.34-36). These preparations could then be cooked (no.5-22; no.33-37) or sterilized (no.23-31). A 37th sample was obtained by cooking dried okra (no.37). Table 2 summarizes the formulations and processes undergone by each of the 37 samples. In some cases, the prepared samples were frozen a second time for the sake of convenience of the organization of the experiments.

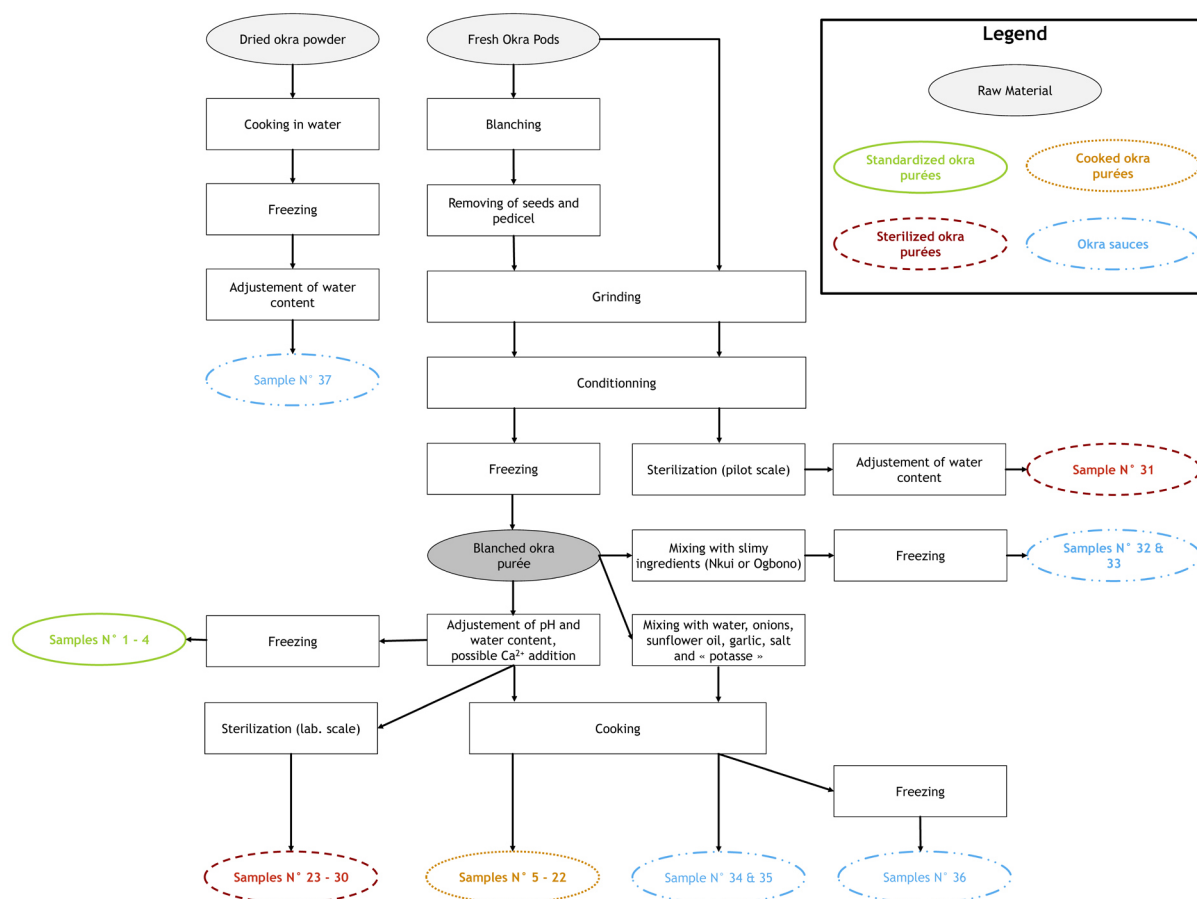


Figure 5: Production diagram of the 37 samples used for rheological and textural analyses.

2.1.1. Preparation of blanched okra purées

Whole fresh okras were purchased locally (Grand Frais and Paris Store, Montpellier, France). They were first steam blanched at 90°C for 7 minutes. After manual removal of seeds and stalks, the okras were ground with water (water/gumbo ratio = ¼; Stephan UMC5, Hameln, Germany, 2007). Given the foaming properties of the product, this operation was performed at 35°C at a reduced pressure of 200 mbar. The resulting purées were vacuum-packed in

polyethylene bags at 100 mbar (Multivac C200, Wolfertschwenden, Germany, 2009), frozen and stored at -18°C. Before use, the purées were thawed for 1 hour at 30°C.

Two batches of blanched okra purées were prepared from 10 and 20 kg of fresh okra, independently of each other (8.1 and 7.8% dry matter and pH of 6.1 and 6.4 respectively). These blanched okra purées were then used to prepare all samples except samples 31 and 37.

2.1.2. Preparation of standardized okra purées

From the blanched okra purée, samples 1 to 4 were prepared by adjusting the water content with distilled water, and pH by adding a 2% sodium carbonate solution (Table 2).

2.1.3. Preparation of cooked okra purées

From blanched okra purée, 15 samples (no.5-19) were formulated according to a three-factor Doehlert experimental design (Doehlert, 1970). The pH varied from 4 to 8 (addition of citric acid solution at 0.3 g·mL⁻¹ or sodium carbonate solution at 0.2 g·mL⁻¹), the water content from 12 to 18 kg·kg_{DM} (addition of distilled water) and the Ca²⁺ ion content from 0 to 4.8 g_{Ca²⁺}·kg_{DM} (addition of calcium chloride to 7 g·mL⁻¹). To complete the design of experiments, 3 other formulations were also chosen (samples 20-22). After packaging in 370 mL glass jars, all these purées were then cooked at 70 or 85°C for 20 min in a water bath and cooled in a bath of melting ice for 30 min.

2.1.4. Preparation of sterilized okra purées

Eight Sterilized okra purées (no.23-30) were prepared in the laboratory by varying the pH, water and calcium contents in the same way as for cooked okra purées. Various sterilization treatments were tested to cover the range of sterilization values conventionally used for canned vegetables ($2.5 < F_0 < 10$ min). After formulation, the purées were packaged in 106 mL glass jars. They were preheated in a water bath at 70 °C for 20 min and then sterilized in an autoclave (SANOclav KL-71, Wolf, Geislingen, Germany, 1985). The core temperature of the vials was recorded every 20 s during processing using an on-board probe held in position in their geometric center (PicoVACQ, TMI-Orion, Castelnau-le-Lez, France).

A complementary test was carried out at pilot scale on unblanched okra and that were ground with their seeds (no.31). In this case, the product was packaged in tin-plated steel cans (390 g) and sterilized in a semi-industrial autoclave (118L, Type 50, Auriol, Marmande, France, 1990). The core temperature was measured every 20 seconds with a probe placed in the geometric center of the box. The water content of the sterilized purée was 11.3 (kg/kg dry matter), but it was readjusted according to Table 2 before rheological and textural measurements were made.

The sterilization value F_0 (min) was conventionally calculated from core temperature measurements T (°C) as a function of time t (min) by numerical integration of the Bigelow formula.

Chapitre 2: Clustering of instrumental methods to characterize the texture and the rheology of slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) suspensions

Table 2. Summary of main preparation process and formulation of the 37 samples used for rheological and textural analysis

Sample Number	Name	pH	Water content (kg/kg dry matter)	Added calcium (g Ca ²⁺ /kg dry matter)	Thermal process Temperature (°C) x time (min) [F ₀ for sterilization (min)]	
1	Standardized okra purées	7.2	15.8	0		
2		7.3	25.3	0		
3		6.4	19.0	0		
4		7.1	19.5	0		
5	Cooked okra purées	6.0	14.9	2.4	70 x 20	
6		6.0	16.4	2.4		
7		4.5	11.9	2.4		
8		7.1	12.2	2.4		
9		4.6	17.2	2.4		
10		7.4	16.5	2.4		
11		4.6	14.5	0.7		
12		7.4	14.8	0.7		
13		4.6	14.9	4.1		
14		7.4	14.6	4.1		
15		6.0	12.2	0.7		
16		6.1	17.9	0.7		
17		6.0	12.0	4.1		
18		6.0	17.1	4.1		
19		6.0	14.6	2.4		
20		6.2	15.9	0		
21	7.2	15.1	4.8			
22	7.3	15.0	4.8	85 x 19		
23	Sterilized okra purées	5.2	15.4	0	115 x 58 [F ₀ = 5.4]	
24		5.9	16.3	0	125 x 22 [F ₀ = 3.4]	
25		5.4	15.9	0	125 x 26 [F ₀ = 7.3]	
26		5.7	15.8	0	120 x 35 [F ₀ = 6.7]	
27		5.5	16.2	0	120 x 50 [F ₀ = 9.9]	
28		4.3	12.6	3	125 x 24 [F ₀ = 7.5]	
29		7.6	11.8	4.8	125 x 24 [F ₀ = 8.1]	
30		6.4	15.3	4.8	125 x 21 [F ₀ = 5.6]	
31		5.7	18.2	0	121 x 60 [F ₀ = 4.2]	
32	Okra sauces†	With Nkui	6.6	26.3	0	
33		With Ogbono	5.8	10.1	0	80 x 30
34		Traditional recipe 1	7.7	7.1	0	70 x 15
35		Traditional recipe 2	6.5	8.8	0	70 x 15
36		Frozen traditional recipe 2	6.5	8.8	0	70 x 15
37		Dried okra sauce	6.3	18.5	0	85 x 20

†: See section 2.1.5. for further explanations about Okra sauce formulation and preparation.

2.1.5. Preparation of Okra sauces

Based on a traditional Cameroonian recipe for okra sauce, three samples (no.34-36) were prepared using the following ingredients: fresh okra 46.9% (w/w), water 39.4%, onions 8.4%, sunflower oil 3.5%, garlic 1.0%, salt 0.5% and 0.3% of a traditionally called "potash". This "traditional alkaline salt" is known to have an improving effect on the texture of sauces made with okra or nkui (Ngoualem, Nguimbou, & Ndjouenkeu, 2019). The "potash" used contained 170.6g/kg sodium, 42.6g/kg potassium, 14.0g/kg calcium and 4.1 g/kg magnesium and had a high alkalizing power ($3.69 \text{ meq}\cdot\text{kg}^{-1}$). The whole preparation was cooked for 15 minutes at 70°C.

Two other sauces were prepared with slimy ingredients to boost the textural properties of Blanched okra purées. Sample no.32 was prepared by mixing 28% (w/w) nkui suspension, 29% water and 44% fresh okra purée. The nkui suspension used (dry matter content 1.3%) was obtained by decoction of frozen *Triumfetta pentandra* bark (JDC Africa, Paris) in boiling water for 10 min ($0.2 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) which was then stirred for 5 min with a mixer equipped with a beater (RM8, Robot Coupe, Montceau-en-Bourgogne, France) before being sieved (1mm screen). Sample no.33 was obtained by adding an ogbono suspension to blanched okra purée in the proportions ($0.5 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$). This ogbono suspension had previously been obtained from dika nut kernels (*Irvingia gabonensis*) (Merveilles d'Afrique, Paris, France), dried, ground and cooked in water for 30 min (0.09 kg almond powder/kg water).

Finally, sample no.37 was prepared with dried okra from Mali (Ben Produits Exotiques, Paris, France). The okra was rehydrated and cooked in water at 85°C for 10 min. Before being readjusted for rheological and textural measurements according to Table 2, the water content of the sample was 11.0 kg/kg (dry matter).

After preparation, with the exception of sample no.31, all these samples were vacuum-packaged in polyethylene bags and then, for the most part, frozen at -18°C.

For the remainder of the article, the term suspension will be used to refer to all samples (purées and sauces) used in this work.

2.2. Instrumental measurement methods

2.2.1. Physico-chemical measurements

The water content was determined by drying at 105°C for 24 hours and is expressed in kg/kg of dry matter (DM). The pH was measured using a TitroLine® 5000 pH meter (SI Analytics, Weilheim, Germany, 2017). The density of samples no.5 to 19 was evaluated by measuring the mass of a known volume of sample. Each pH, water content and density measurement was performed in triplicate.

2.2.2. Textural characterization

The operating conditions under which the Texture Analyzer was used to perform penetration and stretching texture measurements are summarized in Table 3. Penetration measurements (firmness and adhesiveness) were performed in triplicate.

The experimental device used to measure the stringy nature is adapted from (Gilbert, Savary, Grisel, & Picard, 2013), and is described Figure 6. In order to avoid the test to be affected by surface heterogeneities and to guarantee the contact between the probe and the suspensions, the probe penetrated slightly inside ($2 \text{ mm} \ll$ depth of the steel cylinder) before stretching.

After the recording of the stretching test with a camera, the software VLC media player was used to extract the image corresponding to the maximum filament breaking length prior to rupture. Then the length of the filament was measured with the software ImageJ (Rueden et al., 2017; Schindelin et al., 2012). Each measurement was repeated 15 times. The stringiness is the average of the 15 measurements.

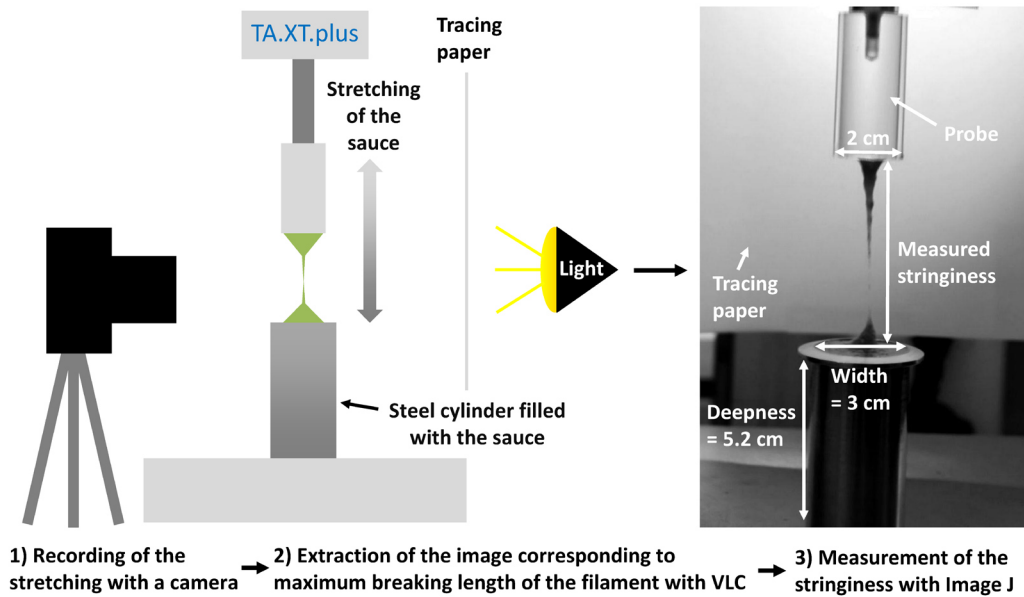


Figure 6: Drawing of the experimental set-up for stringiness measuring

2.2.3. Rheological characterization

The operating conditions under which the rheometer was used to perform oscillatory and steady shear measurements are summarized in Table 3. Each sample was measured 3 to 5 times with a rheometer. In order to allow a relaxation phase, the oscillatory test only started 15 minutes after the mobile was immersed in the solution. The steady shear measurement followed the oscillatory shear measurement. From the measurements made in oscillation strain sweep, the Rheoplus software was used to calculate the strain ($\gamma_{LVEG'}$) and the stress ($\sigma_{LVEG'}$) at the boundary of the Linear Viscoelastic Region (LVR), the moduli at the boundary of the LVR ($LVEG'$, $LVEG''$, $LVEG^*$ and $LVE_{\tan\delta}$), as well as the modulus $G'=G''$, the strain ($\gamma_{G'=G''}$) and the stress ($\sigma_{G'=G''}$) at the cross-over point. The Flow Transition Index (FTI) was calculated by dividing $\sigma_{G'=G''}$ by $\sigma_{LVEG''}$ (Corker, Ng, Poole, & García-Tuñón, 2019). From the steady shear data, the apparent viscosities at 10 s^{-1} and 100 s^{-1} were determined. The Rheoplus software was used to calculate the consistency index K and the flow behavior index n using the Ostwald-de Waele equation (eq. 1).

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (\text{eq. 1})$$

Where:

- τ = shear stress (Pa)
- $\dot{\gamma}$ = shear rate (s^{-1})
- K = flow consistency index ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)
- n = flow behavior index

Chapitre 2: Clustering of instrumental methods to characterize the texture and the rheology of slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) suspensions

For the rest of the article, the term instrumental parameters will be used to refer to all variables obtained with the texture analyzer and the rheometer to characterize okra suspensions, which are summarized in Table 3.

Table 3. Instrumental methods and parameters selected for characterizing rheological and textural properties of okra suspensions

Material	Type of measurement	Methods			Value range obtained with the 37 samples
		Selected parameter	Description	References	
Anton Paar MCR 301 rheometer equipped with the starch cell C-ETD160/ST and with the measuring geometry ST24-2D/2V/2V-30 (stirrer with 3 pairs of blades)	Oscillation strain sweep test: frequency = 1 Hz; strain interval = [0.001; 1000] %; 5 measurement/strain decade; temperature = 25°C	LVEG'	Elastic modulus at the end of the Linear Viscoelastic Region	Mezger (2006) & Walls, Caines, Sanchez, & Khan (2003)	[100; 7410] Pa
		LVEG''	Viscous modulus at the end of the Linear Viscoelastic Region		[30; 1500] Pa
		LVEG*	Complex modulus at the end of the Linear Viscoelastic Region		[100; 7540] Pa
		LVEtanδ	Damping factor at the end of the Linear Viscoelastic Region		[18; 35] %
		γ _{LVEG'}	Strain at LVEG' (limit of the Linear Viscoelastic Region)		0,10%
		σ _{LVEG'}	Stress at LVEG'		[0.1 ; 7.5] Pa
		G'=G''	Modulus at cross-over point		[10; 940] Pa
		σ _{G'=G''}	Stress at cross-over point		[13; 470] Pa
		γ _{G'=G''}	Strain at cross-over point		[6; 250] %
	Flow measurement under steady state : shear rate interval = [0.001; 1000] s ⁻¹ ; 5 measurement/shear rate decade; temperature = 25°C	FTI	Flow Transition Index = σ _{G'=G''} /σ _{LVEG'}	Corker, Ng, Poole, & García-Tuñón (2019)	[17; 380]
		K	Consistency index K calculated using the de Waele-Ostwald equation	Mezger (2006), Holdsworth (1971)	[3; 340] Pa.s ⁿ
		n	Flow behavior index calculated using the de Waele-Ostwald equation		[0.16; 0.66]
		η ₁₀	Apparent viscosity measured at 10 s ⁻¹	Sharma, Kristo, Corredig, & Duizer (2017)	[2; 50] Pa.s
		η ₁₀₀	Apparent viscosity measured at 100 s ⁻¹		[0.6; 6] Pa.s
Stable Micro Systems TA.XT.plus Texture Analyzer equipped with the same PVC cylindrical probe (diameter = 2 cm)	Penetration: The sauce was poured and tossed in a glass beaker (depth = 3 cm; diameter = 6 cm). The sample was left to relax for 2 min, before a single compression test was performed with following settings: Pre-test, test and post-test speed = 2 mm.s ⁻¹ ; trigger force = 3 g; penetration distance = 3 mm. Temperature = 25°C (±1°C)	Firmness	Maximum force measured at the end of the penetration into the product	Nishinari et al. (2019), Rosenthal (2010), Bourne (2002)	[45; 260] mN
	Adhesiveness	Area under the curve force corresponding to the work of adhesiveness while the probe is pulling up back from the sauce	[60; 690] N.m		
	Stretching: The sauce was poured and tossed in a steel cylinder (diameter = 3 cm). The sample was let to relax for 2 min before that a single compression test was performed with following settings: Pre-test speed = 10 mm.s ⁻¹ , test and post-test speed = 40 mms.s ⁻¹ ; trigger force = 2 g; penetration distance = 2 mm. Temperature = 25°C (±1°C)	Stringiness	Average breaking length of the filament	Gilbert et al. (2013)	[1.2; 9.4] cm

2.3. Data processing and statistics

Measurements made in oscillatory shear rheology were considered valid if the measured torque was above the rheometer detection limit (50 nNm). This was the case for all samples except sample no. 37, for which oscillatory shear data were not taken into account.

The data were analyzed using R-3.5.1 software (R Core Team, 2018). The coefficient of variation was the indicator used to assess the repeatability of our measurements for each parameter and sample. A Principal Component Analysis (PCA) on the 16 rheological and textural parameter and 37 samples was performed using the FactoMineR package (Lê, Josse, & Husson, 2008). A Pearson correlation matrix was produced using the corrplot package v0.84 (Wei & Simko, 2017). The other graphical representations were produced using the ggplot2 (Wickham, 2016), ggrepel (Slowikowski, 2018) and ggpubr (Kassambara, 2018) packages.

The analysis of the experimental design was performed using the rsm package (Lenth, 2009). From results of the Doehlert experimental design, correlations were established with a second-order polynomial model (eq. 2) to determine the effects of the main formulation parameter on textural properties:

$$Y = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_i a_{ii} X_i^2 + \sum_{ij} a_{ij} X_i X_j \quad (\text{eq. 2})$$

Where Y is the response (Consistency Index K, Flow behavior index n, Stringiness), X_i is factor i (pH, Water Content, ion calcium content), a_0 is the constant of the model, a_i is the linear effect of X_i , a_{ii} is the quadratic effect of X_i , and a_{ij} the effect of interaction between X_i and X_j .

3. Results and discussion

3.1. Rheological and textural properties of okra suspensions

The wide measurement ranges of the samples (Table 3) show that the rheological and textural properties of the samples are different from each other. It is possible to deduce some rheological properties of the analyzed okra suspensions.

3.1.1. Textural properties

From a textural point of view, okra suspensions have more or less solid properties ($45 < \text{Firmness} < 260$ mN) and adhesive properties ($60 < \text{Adhesiveness} < 690$ N.m). The upper boundary of the stringiness parameter (9.4 cm measured for samples no.35 and 36) shows that some okra suspensions can have remarkable elongational properties. This is consistent with the study of the elongational properties of okra mucilage conducted by Yuan et al. (2018). This result also shows that it is possible to measure instrumentally the stringy properties which African consumers evaluate by hand and visually.

3.1.2. Rheological properties

The LVR of all suspensions extended to a strain of $\gamma_{LVEG'} = 0.1\%$. The interval [18%; 35%] in which the values of $LVEtan\delta$ (Table 3) are included, means that in the LVR, the suspensions have mechanical properties of viscoelastic solids, varying in magnitude depending on the samples. However, they are not real gels ($LVEtan\delta > 10\%$).

When the strain exceeds the threshold of $\gamma_{LVEG'} = 0.1\%$, the decrease in G' indicates that the material begins to deform in a non-reversible way (i.e. yield) due to the progressive but irreversible destruction of its internal structure under the effect of the strain. Some suspensions

retain preponderant solid and elastic properties ($G' > G''$) up to very significant strains ($\gamma_{G'=G''} = 250\%$). Others are very fragile and go from solid behaviour ($G' > G''$) to liquid behaviour ($G' < G''$) at low deformations ($\gamma_{G'=G''} < 10\%$).

The shear stresses required to irreversibly deform okra suspensions ($\sigma_{LVEG'}$) or cause them to flow ($\sigma_{G'=G''}$) vary from one sample to another (Table 3). Yield stress is a characteristic property of structured fluids (Nakauma, Ishihara, Funami, & Nishinari, 2011) that can be estimated with $\sigma_{G'=G''}$ (Walls, Caines, Sanchez, & Khan, 2003). The FTI is the ratio between $\sigma_{G'=G''}$ and $\sigma_{LVEG'}$ and can be used to characterize how the internal structure of the suspensions breaks. The closer the FTI is to 1, the more brittle the suspensions are (Corker et al., 2019). On the opposite, the higher the FTI is, the more ductile the material is, i.e. it has the ability to deform plastically without breaking. The FTI measurement range shown in Table 3 indicates that some suspensions are not very resistant to deformation ($\min_{FTI} = 17$) while others are very ductile ($\max_{FTI} = 380$).

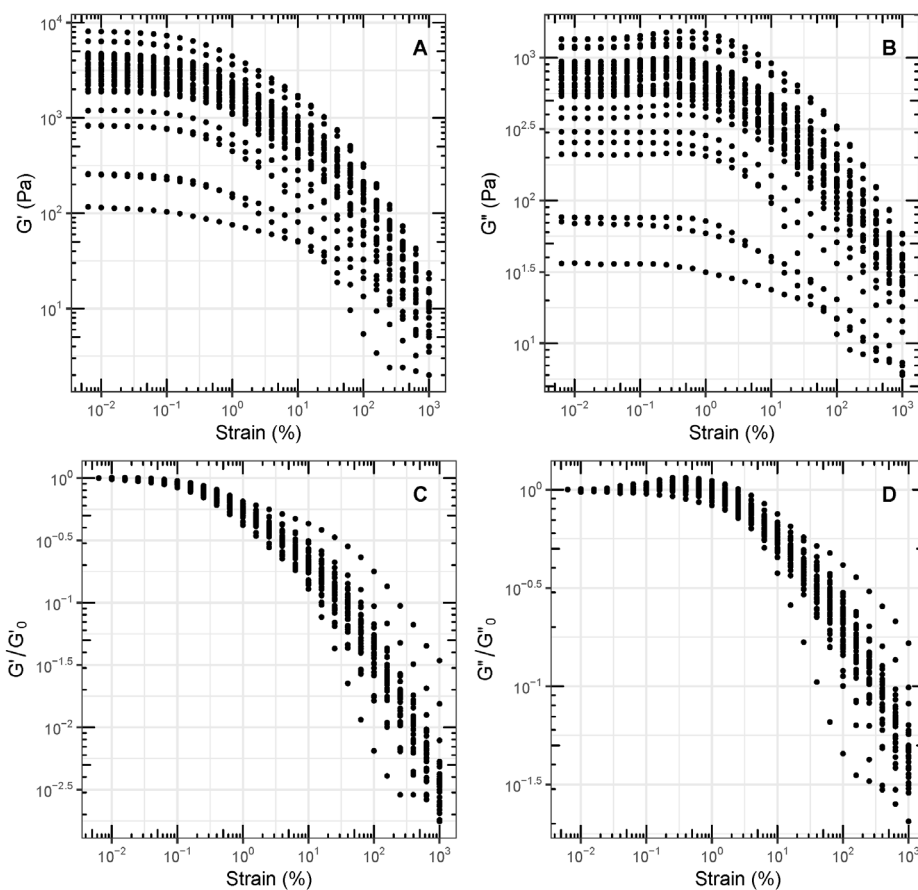


Figure 7: Elastic (G') and Viscous (G'') moduli of the 36 samples (measurements of the sample no.37 were not valid) as a function of strain at 1Hz (A and B). Reduced moduli G'/G'_0 and G''/G''_0 versus strain, where G'_0 and G''_0 are the moduli measured at the beginning of the linear viscoelastic region (see (Hyun et al., 2002)).

These rheological properties, which are original for sauces, are certainly linked to the existence of complex molecular structures. Observation of the curves from the oscillation strain sweep test (Figure 7) revealed that for the majority of samples (33/36 samples), at the end of the LVR, there was a slight increase in the value of G'' , which is characteristic of a "weak strain overshoot" type behavior (Hyun, Kim, Ahn, & Lee, 2002). According to Hyun et al. (2002) and Mezger (2006), the complex structure made of polymer chains resists strain up to a certain threshold. Beyond this, the structure begins to crack and friction between the different layers

causes G'' to increase. When the strain reaches a new threshold, G'' decreases as the structure breaks completely allowing the chains and/or microstructures to align in the direction of flow. This behavior would be favored by the presence of long side chains, their arrangement in space under the effect of electrostatic repulsion and the degree to which they entangle with each other to form a more or less flexible structure. In the case of okra suspensions, this explanation is plausible since it has been shown that okra pectins are of variable length and branching, with more or less long side chains (Kpodo et al., 2018) and that they can entangle with each other via hydrogen, hydrophobic and calcium bonds (Ritzoulis, 2017). In fact, the samples (no.8, 10, 21, 22, 24, 30 and 34) for which the weak strain overshoot behavior is the greatest (i.e. $\max_{G''/G''_0} > 1.1$) have fairly high pH values and their formulation has often been enriched with divalent cations (Table 2). Only samples n°2, 3 and 33 have a strain thinning behaviour ($\max_{G''/G''_0} = 1$) which can be explained by the disentanglement of the polymer chains and their progressive alignment in the direction of flow as the strain increases (Hyun et al., 2002). These differences in behavior indicate that the internal structures of the suspensions react differently to the increase in strain.

The consistency index K and the flow behavior index n are used to characterize their flow properties. The measurement ranges of parameters K and n (see Table 3) are in line with those obtained on other fruit and vegetable purées (Holdsworth, 1971). The fact that n is less than 1 for all samples means that okra suspensions have a shear thinning behavior.

These results show that different instrumental methods can be used to characterize the rheological and textural properties of okra suspensions. The next step is to identify instrumental parameters that are necessary and sufficient to characterize and monitor the evolution of the specific rheological and textural properties of these sauces as a function of their formulation and the preservation process applied.

3.2. Repeatability of instrumental measurements

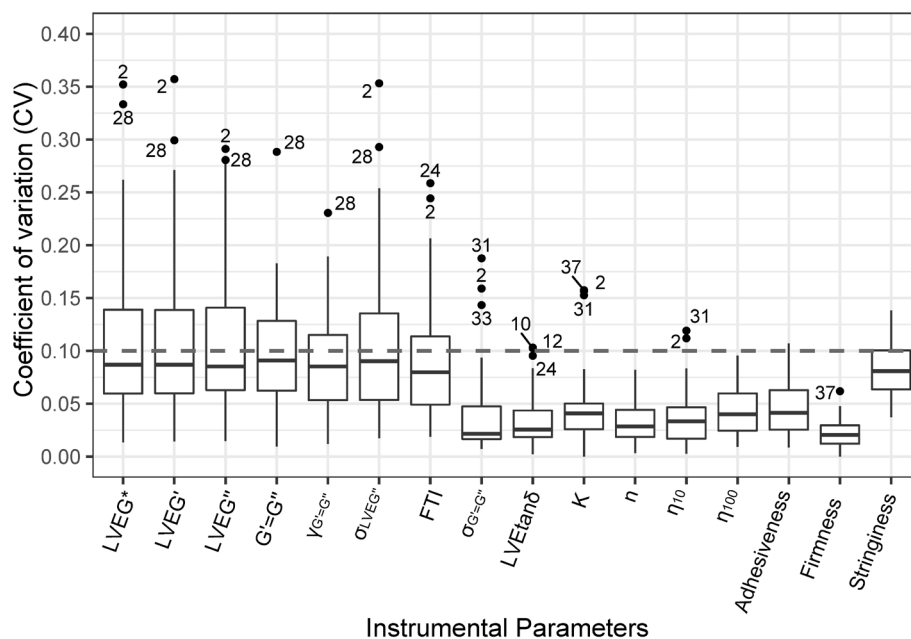


Figure 8: Distribution of coefficient of variation (CV) measured on the 37 samples for the 16 rheological and textural parameters. The numbers indicate the samples for which an extreme CV has been measured. The 10% dashed line corresponds to the threshold above which the measurement was not considered repeatable.

A significant proportion of samples have a coefficient of variation (CV) greater than 10% for most measurements obtained by oscillatory shear rheology (LVEG', LVEG'', LVEG*, $G'=G''$, $\gamma_{G'=G''}$, $\sigma_{LVEG'}$, FTI and $\sigma_{G'=G''}$, Figure 8). LVEtan δ is the only parameter obtained in dynamic rheology for which all the points have a CV < 10% and which can therefore be considered as repeatable. This low repeatability of oscillatory shear measurements comes in addition to the fact that they were not valid for one sample (no. 37).

The median CV of the stringiness measurement is about 8% (Figure 8). For 75% of the samples, it is less than 10% and less than 15% for the remaining 25%. This indicates a good level of repeatability for the stringiness measurement. For parameters measured with the texture analyzer (firmness, stickiness) and in steady shear rheology (K, n, η_{10} et η_{100}), the measured VC for almost all samples is less than 10% and the median CV is less than 5%. The repeatability of these 4 parameters is therefore excellent.

However, we notice that for the consistency index K, a minority of samples (samples no.2, 31 and 37) have a CV of close to 15%. For these samples, the repeatability of K is less good but remains at an acceptable level. These samples are among the most watery and have a very low consistency index K (< 30 Pa.sⁿ, Figure 9). These results may indicate that for the consistency index K, there is a limit of quantification below which the measurement is less repeatable and which can lie between 30 and 50 Pa.sⁿ. The water content alone does not fully explain the lower repeatability of the consistency index K measurements for these 3 points since sample no.32 has a CV lower than 5% while its water content is high (26.3 %).

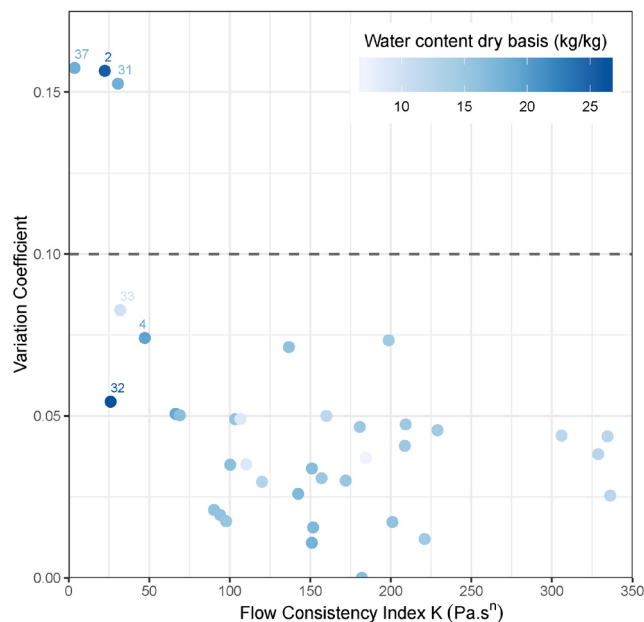


Figure 9: Variation coefficient of consistency index K vs measured consistency index K. The color gradient of the points corresponds to the water content (dry matter) of the measured samples. The sample number is written when the measured value is less than 50 Pa.sⁿ. The 10% dashed line corresponds to the threshold above which the measurement was not considered repeatable.

3.3. Reduction of the number of instrumental parameters

3.3.1. Correlation of instrumental parameters with each other

In the Figure 10, it can be seen that a 2-dimensional space allows to represent 86% of the variance carried by the 16 parameters. The first dimension of the PCA (Figure 10A) is well correlated ($p < 5\%$) with the parameters η_{10} ($r = 0.99$), K ($r = 0.98$), $LVEG'$ ($r = 0.97$), $LVEG^*$ ($r = 0.97$), η_{100} ($r = 0.97$), $\sigma_{LVEG'}$ ($r = 0.97$), firmness ($r = 0.95$), $\sigma_{G'=G''}$ (0.94), n ($r = -0.91$), $LVEG''$ ($r = 0.88$), adhesiveness ($r = 0,86$) and $LVEtan\delta$ ($r = -0.77$). To a lesser extent, it is also correlated with the water content measurement ($r = -0.50$). The first component of PCR can therefore be interpreted as a dimension positively correlated with the viscous, elastic, shear thinning and adhesive properties of suspensions. The negative correlation of the water content (supplementary variable) with the first dimension illustrates this interpretation. The second dimension of the PCA is well correlated ($p < 5\%$) with the parameters $\gamma_{G'=G''}$ ($r = 0.89$), $G'=G''$ ($r = -0.78$), stringiness ($r = 0.75$) and FTI ($r = 0.68$). This second dimension is therefore positively correlated with the ductility and stringy properties of suspensions. It certainly corresponds to the cohesiveness when defined as "the extent to which a material can be deformed before it ruptures" (Brenner et al., 2014).

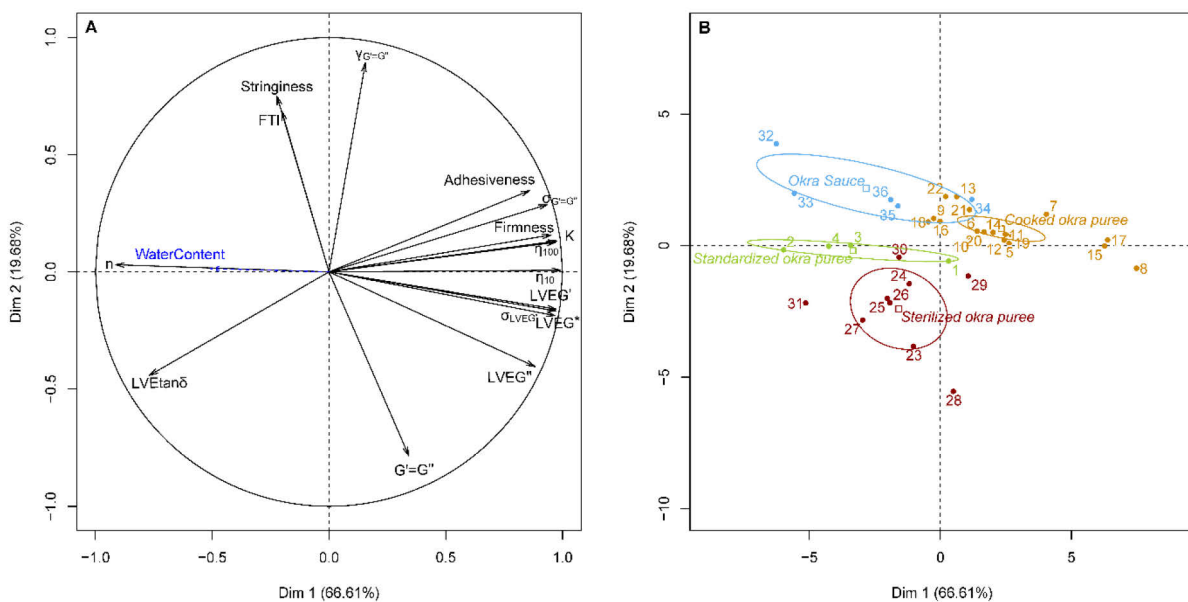


Figure 10: Principal Component Analysis (PCA) bi-plot of the 16 textural and rheological parameters and the 36 samples. The explained variance for PC1 and PC2 is 66.61 % and 19.68 %. On the parameters factor map (A), Water Content is a supplementary parameter that does not contribute to the formation of the components. On the Projection of individuals (B), the number indicates samples and confidence ellipses were traced around the samples categories.

The meaning given to the two dimensions makes it possible to characterize the differences between the types of samples. On the first dimension of Figure 10B, the "Cooked okra purées" are clearly distinguishable (right) from the three other sample groups (left). On the second dimension, three groups of samples can be distinguished: Sterilized okra purées (bottom), Standardized okra purées and cooked okra purées (middle) and Okra sauces (top). The study of their viscous, elastic, shear thinning and adhesive properties made it possible to distinguish two groups of suspensions, while the study of their ability to resist plastic deformation without breaking made it possible to distinguish three groups of suspensions. Two dimensions are

therefore sufficient to characterize the rheological and textural properties of slimy suspensions and necessary to differentiate them. This is consistent with the proposal of van Vliet (2002), for whom it is the combination of several parameters (viscosity, shear rate thinning behaviour and elongational flow) that would allow a good estimate of the slimy level of a solution. This result is also in line with the work of Yuan, Ritzoulis & Chen (2018) and Leakey et al. (2005) for whom it is the combined study of the viscous and elongational properties of okra mucilage; for the former, and of soups made with dika nut kernels; for the latter, that would best describe the original mechanical and textural properties of these slimy ingredients. Finally, in the context of research seeking to identify "gum based thickeners" with "ease of swallowing" properties, E. K. Hadde & Chen (2019) have shown the interest of jointly studying these two dimensions.

3.3.2. Identification of the parameters best correlated with the others

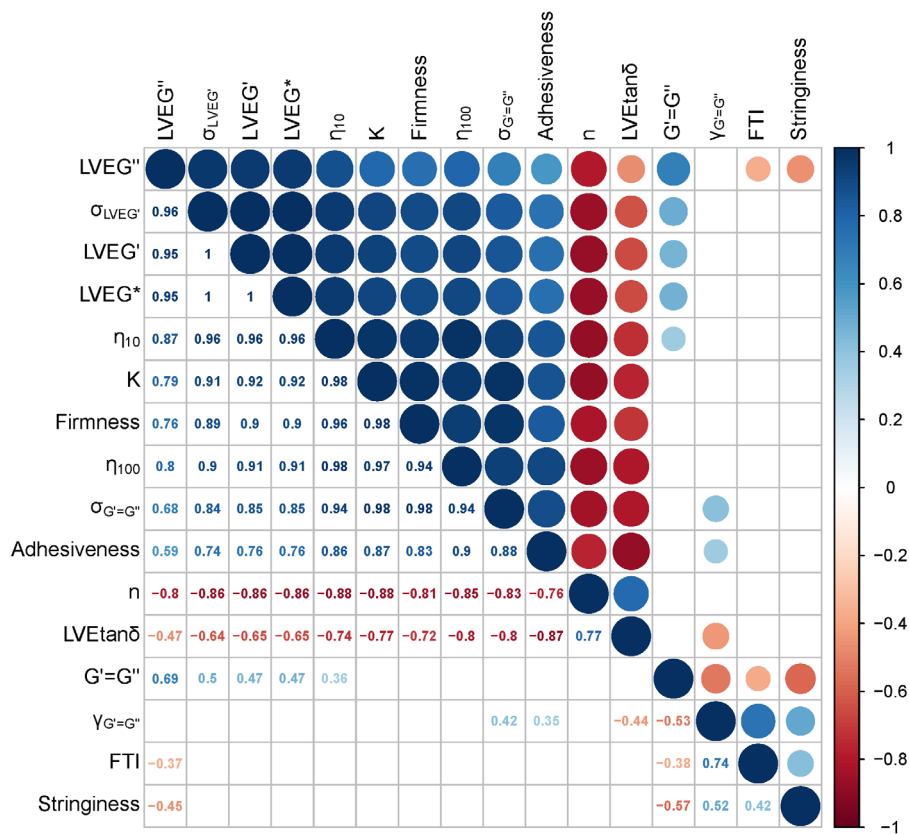


Figure 11: Pearson correlation coefficients matrix of the 16 parameters. The lower left half shows the Pearson correlation coefficients significant at the 5% threshold. The upper right half shows the graphical representation of these coefficients: their color depends on the sign of the correlation while the size of the disks and the intensity of the color represent the intensity of the correlation.

At the top left of the Figure 11, a group of parameters, all correlated to each other, is clearly apparent (LVEG'', $\sigma_{LVEG'}$, LVEG', LVEG*, η_{10} , K, firmness, η_{100} , $\sigma_{G=G''}$, adhesiveness, n and LVEtan δ). These parameters are also those that contribute significantly and strongly to the formation of the first dimension of the PCA (Figure 10A). Within this group, K and n are the two repeatable measurements (CV<10%, see Figure 8) that are best correlated with the other parameters. Indeed, the intensity correlation of K with the other parameters of this group is between 0.77 and 0.98 while the intensity correlation of n is between 0.76 and 0.88. K and n are therefore the most relevant parameters to characterize the first dimension of the PCA. From a practical point of view, it is not necessary to select one of these two parameters since

they are measured at the same time and are complementary in characterizing the flow of suspensions.

At the bottom right of Figure 11, the parameters $\gamma_{G'=G''}$, $G'=G''$, FTI and stringiness form a second group that corresponds to the second dimension of the PCA (Figure 10A). Within this group, the parameters $\gamma_{G'=G''}$ and stringiness are the two parameters best correlated with the other parameters since the intensities of their correlations with the other parameters in this group are respectively between 0.52 and 0.74 and between 0.42 and 0.57. It seems more interesting to select stringiness because it is the only one of these four parameters to allow a valid measurement of sample no.37 and it has a better repeatability than $\gamma_{G'=G''}$, $G'=G''$ and FTI (Figure 8).

3.3.3. Comparison of the differentiating power of the consistency index K with the other parameters of the "consistency dimension"

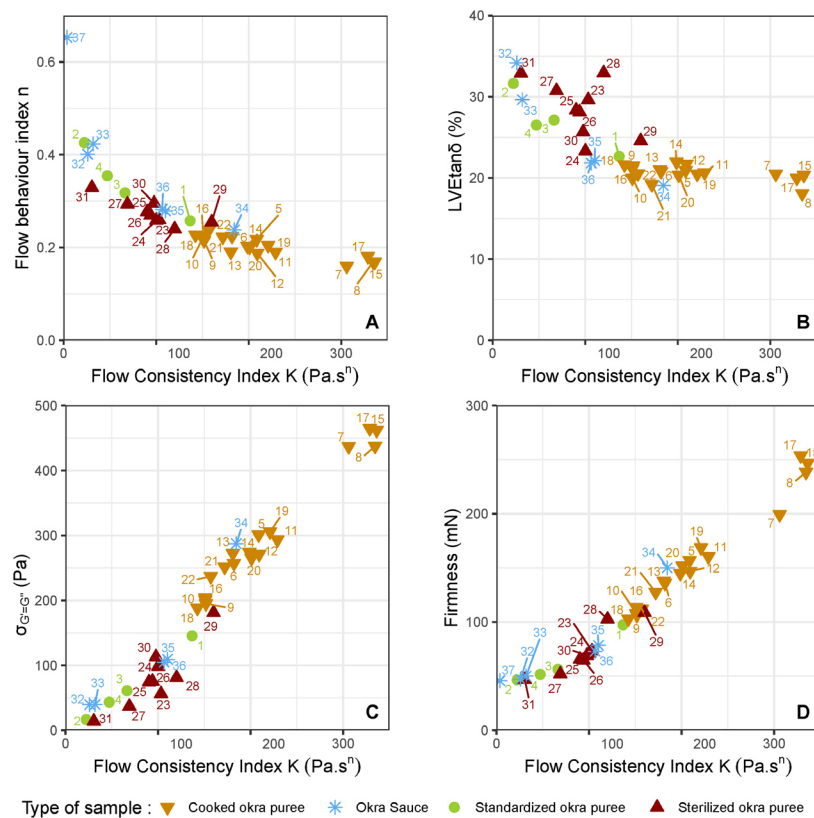


Figure 12: Graphical illustrations of the correlation between the consistency index K and the main rheological and textural properties of the first dimension of the PCA: flow behavior index n (A), $LVEtan\delta$ (B), $\sigma_{G'=G''}$ (C) and firmness (D).

K is very well correlated with the shear thinning (Figure 12A) and viscoelastic (Figure 12B) properties of okra suspensions as well as with their yield stress (Figure 12C) and firmness (Figure 12D). Since the flow behavior index n is less well correlated with these parameters than with K (Figure 11) and the amplitude of its measurement range is less important (Table 3), its correlations with these parameters has not been plotted in order not to multiply the graphical representations.

In the Figure 12A and 12B, we observe that compared to flow behaviour index n and $LVEtan\delta$, K makes it easier to distinguish the 4 samples (no. 7, 8, 15 and 17), for which the

value of K is high ($> 300 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$), from the rest of the Cooked okra purées. In Figures 12C and 12D, we can see that compared to $\sigma_{G'=G''}$ and firmness, K allows to better differentiate samples with a value lower than $100 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$. This confirms that among the parameters of the first dimension, the consistency index K is the most suitable for differentiating samples from each other, including for high and low values of its measuring range. However, like the other parameters of the consistency dimension (Figures 10B and 12), K does not allow a clear distinction between samples of the Sterilized okra purées, Standardized okra purées and Okra sauces types which have similar values.

3.3.4. Comparison of the discriminating power of stringiness with the other parameters of the "ductility-cohesiveness" dimension

As suggested by the correlation coefficients in Figure 11, it can be seen in Figure 13 that the correlations between the parameters carried by the "ductility-cohesiveness" dimension are of lower quality than for the "consistency dimension" parameters (Figure 12). This is due in particular to the presence of a few samples (No. 23, 28, 32, 35 and 36) for which the values obtained are very different from the lot.

In Figure 13A, 7/9 of Sterilized okra purées samples have a $G'=G''$ value similar to that of the Cooked okra purées group. Moreover, Okra sauces and Standardized okra purées samples have comparable values. In Figure 13B, the Okra sauces samples have values of $\gamma_{G'=G''}$ comparable to those of the Cooked okra purées group. In Figure 13C, except for samples 32 and 33, it is not possible to distinguish between Okra sauces, Standardized okra purées and cooked okra purées samples using the measured FTI values. Therefore, the parameters $G'=G''$, $\gamma_{G'=G''}$ and FTI, shown vertically in Figures 13A, 13A and 13C, do not allow the sample groups to be correctly distinguished from each other. On the other hand, Stringiness, represented horizontally on the 3 graphs in Figures 13, makes it possible to clearly distinguish three groups of samples: Sterilized okra purées on the left, Standardized okra purées and cooked okra purées in the center, and Okra sauces on the right. Stringiness is therefore the parameter that best complements K since, unlike K (Figure 12), stringiness clearly distinguishes samples of the "Okra sauces", "Sterilized okra purées" and "Standardized okra purées" types.

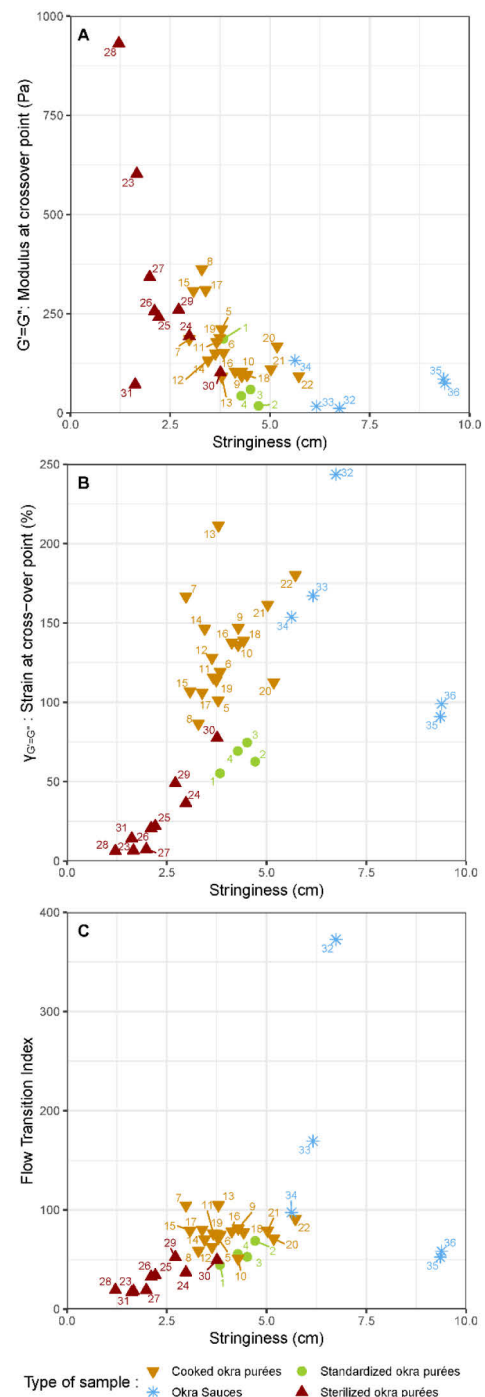


Figure 13: Graphical illustrations of the correlation between stringiness and the main rheological and textural properties of the second dimension of the PCA: $\gamma_{G'=G''}$ (A), $G'=G''$ (B), FTI (C).

3.3.5. Space formed by the stringiness and flow parameters to characterize the samples

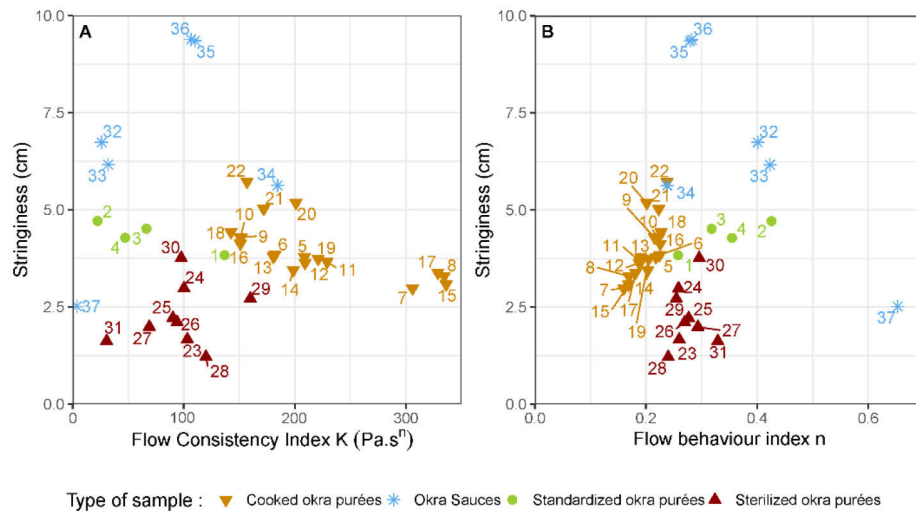


Figure 14: The two-dimensional space formed by stringiness in combination with the consistency index K (A) and the flow behavior index n (B).

The two-dimensional space formed by the combination of stringiness with K or n makes it possible to clearly distinguish the 37 suspensions that have been produced by varying the formulation and production process of the suspensions (Figure 14A and B). With the exception of sample no.37, the four types of samples form homogeneous groups and are clearly distinguishable from each other.

In Figure 14A and B, it can be seen that some samples have a similar flow properties but a very different stringiness level (see samples no.23 and no.36 for example). This result is consistent with the work of Hadde & Chen (2019) who showed that fluids could have similar properties when subjected to "shear deformation" but very different properties when subjected to "extensional deformation". In Figure 14A and B, we can see that the opposite is also true: some samples may have similar properties when subjected to "extensional deformation" but very different ones when subjected to "shear deformation" (see samples no.17 and no.30 for example). The combination of flow and stringy properties measurements is therefore suitable for discriminating slimy suspensions.

3.1. Ability of the stringiness and flow parameters to characterize the impact of the process and formulation on the textural properties of okra

3.1.1. Impact of the process on the textural properties of okra

The graphs in Figure 15 distinguish the effects of water content and process on both stringiness and suspension flow. The increase in the water content of the suspensions leads to a decrease in their consistency index K (Figure 15A) and a degradation of their shear thinning properties (increase of n in Figure 15B). However, its effect on stringiness is not obvious (Figure 15C).

Cooked okra purées and Sterilized okra purées have a similar water content (respectively between 11.9 and 17.9 and between 11.8 and 18.2 kg/kg dry matter, Table 2). Figure 15A, B and C show that compared to Cooked okra purées, Sterilized okra purées have a lower consistency index K, a higher flow behaviour index n and a lower stringiness level. This means that sterilization degrades the consistency, shear thinning properties and elongational properties of okra suspensions. These results confirm and supplement the researches of Inyang & Ike (1998) and Woolfe, Chaplin, & Otchere (1977), who observed degrading effects of blanching and cooking on okra viscous properties. The increase in LVEtan δ induced by sterilization (data not shown) reveals that heat treatment degrades the internal structure of okra suspensions. Since the degree of methylation of okra pectins is quite low (< 26 % according to Kpodo et al. (2018)), this degradation is certainly the consequence of the depolymerization of okra pectins by β -elimination or acid hydrolysis (Moelants, Cardinaels, Van Buggenhout, et al., 2014).

In Figure 14, it can be seen that the sample prepared from dried okra (no.37) has very different characteristics from other Okra sauces samples but very similar to those of Sterilized okra purées. In Figure 15, we can see that compared to samples with a close water content (n°3, 16 and 31), sample n°37 is the least consistent sample and shear thinning (Figure 15A and B) and is not very stringy (Figure 15C). These results supplement those of Falade & Omojola (2010) and Inyang & Ike (1998) who showed that the drying process had an effect on the viscosity of the dried okra. It suggests that the conditions under which okra is dried in West Africa can probably be improved.

On the three charts of Figure 15, it can be seen that the characteristics of the 35 and 36 samples are identical. Freezing has no impact on the stringiness and flow characteristics of okra suspensions. This confirms and supplement the results of Olorunda & Tung (1977) and Falade & Omojola (2010).

On the three charts in Figure 15, we can see that the Okra sauces to which other slimy ingredients have been added (no. 32 - 36) have remarkable elongational properties and this for different water content levels. This means that the addition of two slimy ingredients in samples 32 and 33 increased the elongational characteristics of okra suspensions. It can be seen that the three traditional recipes (no. 34 - 36) in which other ingredients, including "potash", have been added, are the stringiest. The presence of this alkaline and mineral-rich ingredient, known for its effect on okra texture (Ngoualem et al., 2019), certainly contributes to the high level of stringiness observed for these samples.

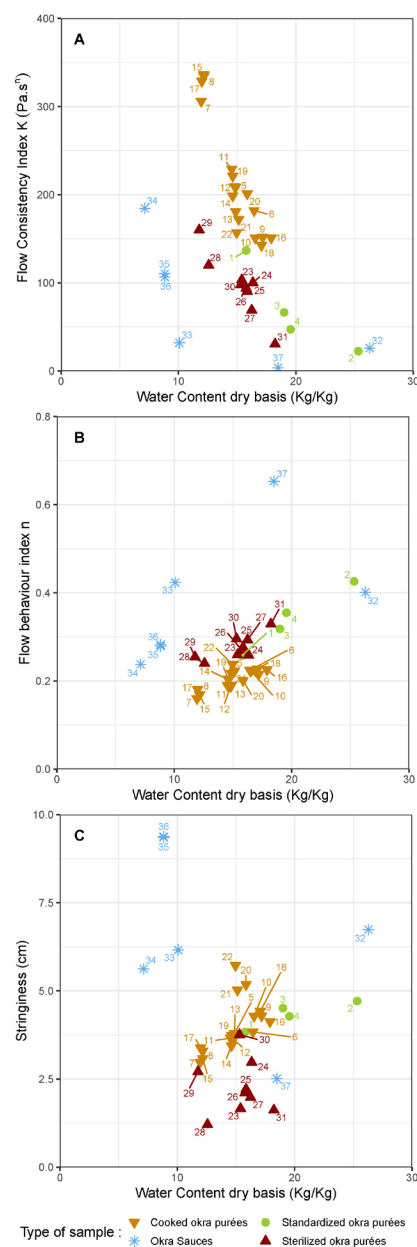


Figure 15: Water-dependence of flow consistency index K (A), flow behaviour index n (B) and stringiness (C) for the 37 suspensions.

3.1.2. Impact of the formulation on the textural properties of okra

Table 4. Effects of pH, water content and calcium ion content on the consistency index K, the flow behavior index n and the stringiness of cooked okra purées (samples n°5-19)

Coefficient [†]	Consistency index K (Pa.s ⁿ)	Flow behaviour index n	Stringiness
Constant			
a ₀	203.9 ^{*****}	0.216 ^{*****}	3.8 ^{*****}
Linear			
a ₁	4.6	0.005	0.0
a ₂	-125.7 ^{*****}	0.037 ^{*****}	0.8 ^{*****}
a ₃	-13.3 [*]	0.0052 [*]	0.1
Interactions			
a ₁₂	-14.8	-0.001	-0.2
a ₁₃	19.1	0.008	-0.2
a ₂₃	-0.5	-0.005	0.0
Quadratic			
a ₁₁	-3.4	-0.032 ^{****}	-0.2
a ₂₂	67.5 ^{*****}	-0.016 ^{**}	0.0
a ₃₃	4.4	-0.014 ^{**}	-0.1
R ²	0.9817	0.9712	0.9539
[†] Indices 1, 2, and 3 refer to pH, Water Content, and Calcium ion content respectively. Significance (p-value) : ***** <0.01% / **** <1% / *** <5% / ** <10% / * <15%			

Table 4 shows that water content has a significant and dominant linear effect on all three parameters and a significant quadratic effect on K and n. The pH has a significant quadratic effect on n of the same order of magnitude as the linear effect of water content. The calcium ion content has a significant linear effect at the 15% threshold on K and n and at the 10% threshold on n but has no effect on the stringiness.

The linear effect of the water content on K ($a_2 = -125.7$) and n ($a_2 = 0.037$) indicates that the increase in water content decreases the consistency index K of the purées and their shear thinning properties. The quadratic effects of water content on K ($a_{22}=67.5$) and n ($a_{22}=0.016$) mean that these degradations are less pronounced as the water content increases. This result is in line with that of Woolfe, Chaplin & Otchere (1977) on okra mucilage. Other authors have observed similar effects of particle concentration on other plant-tissue-based suspensions (Moelants et al., 2014). Increasing the water content above a certain level reduces hydrodynamic interactions between particles, which modifies the flow properties of purées (Moelants et al., 2014).

The pH has a quadratic effect on the flow behavior index n ($a_{11} = -0.032$). Its negative sign indicates the presence of a maximum. Its intensity is of the same order of magnitude as that of the water content ($a_2 = 0.037$), which shows that this effect is quite significant. Woolfe, Chaplin, & Otchere (1977) showed relative viscosity of okra mucilage reaches and optimum when pH values are between 6 and 8. This could be the consequence of the effect of pH on the spatial conformation of okra pectins, which can change from a compact conformation at acidic pH to an extended one at neutral pH (Alba, Bingham, & Kontogiorgos, 2017; Alba, Kasapis, & Kontogiorgos, 2015; Ritzoulis, 2017). Furthermore, Yuan et al. (2018) showed that at pH4, within the okra mucilage, the particles were less numerous but larger than at pH7, and that this imparted its viscosity. Here, it is interesting to note that the pH has been shown to have a strong and significant effect on the density of okra suspensions. At acidic pH,

suspensions foamed (density < 1), which is in accordance with the emulsifying properties of okra pectins at acid pH (Alba, Ritzoulis, Georgiadis, & Kontogiorgos, 2013). All these elements indicate that by acting on the spatial conformation of okra pectins, pH modifies the properties of the matrix they form within the purées, which has an effect on their flow properties.

The calcium ion content has a negative quadratic effect ($a_{33} = -0.014$) on n which is dominant compared to its linear effect ($a_3 = 0.0052$). This means that the increase in calcium ion content causes the n increase until it reaches an optimum. The other effect of the calcium ion content on the flow of the purées is to reduce their consistency index K ($a_3 = -13.3$), which is consistent with the result of Woolfe, Chaplin, & Otchere (1977) and Ndjouenkeu et al. (1996). It has been suggested that by "screening" the negative charges of pectins on the surface of the particles, calcium ions facilitate the flow of purées (Moelants et al., 2014). This effect is thought to have a stronger impact on their rheology than the gelling effect of Ca^{2+} ions on weakly methylated okra pectins.

The stringiness level of the purées increases linearly with their water content ($a_2 = 0.8$). Our results may seem contradictory to those of Yuan et al., (2018) who showed that the increase in mucilage concentration resulted in an increase in break-up time (equivalent to stringiness). The difference of concentration used in the two studies (between 0.25 and 3.00% vs. between 4.9 and 7.4%) can explain this difference. In fact, additional experimental work has shown that stringy properties of okra reached a maximum at an intermediate concentration (data not shown). The relatively high concentrations used may also explain why, unlike Yuan et al. (2018), no significant pH effects on the elongational properties of okra purées were observed.

Of the three factors studied, it is the water content that has a central and dominant effect on the three parameters. But while increasing it degrades the consistency and shear thinning properties of purées, it increases their ductility. These three parameters therefore seem to measure the same phenomenon, namely the structuring or softening of the structured fluid according to its concentration of bio-polymers and particles. On the micro scale, the increase in water content reduces hydrodynamic interactions between particles and the ability of okra pectins to entangle to form a solid and elastic structure. On a macro scale, with the increase in water content, the structure becomes more flexible and its ability to resist plastic deformation without breaking increases: it becomes less fragile and more ductile. While in the experimental field studied, the stringiness of suspensions is only sensitive to water content, their flow properties are also sensitive to calcium ion concentration and pH. As we have shown that the stringiness parameter has a better ability than the flow parameters to differentiate between sample types, this confirms that it is useful to keep all three parameters to study the impact of the process and formulation on the rheology and texture of okra suspensions.

4. Conclusion

Sixteen rheological and textural parameters were measured to characterize the texture and rheology of okra slimy suspensions. These suspensions have viscoelastic, shear thinning, adhesive, stringy, ductile and cohesive properties, and can be classified as structured fluids. A PCA showed that two dimensions are sufficient to characterize their rheological and textural properties and necessary to differentiate them. While the first dimension is correlated with their viscoelastic, shear thinning and adhesive properties, the second dimension is correlated with their stringy, cohesive and ductile properties. Consistency index K and flow behavior index n are two repeatable measures that are very well correlated with the other 10 parameters carried by the first dimension of the PCA. Stringiness is a repeatable measurement that is well correlated with the other three parameters of the second dimension ($\gamma_{G=G''}$, $G'=G''$ and FTI).

Combining the consistency index K and the stringiness is very good at differentiating the samples with respect to the process and the formulation they have undergone. These instrumental parameters therefore seem complementary in their ability to i) characterize the degree of structure of the slimy suspensions as a function of their formulation and ii) monitor the degradation of their rheological and textural properties as a result of the process. This work therefore makes it possible to find levers to limit the degradation of the rheological and textural properties of okra during processing. To this end, it would be helpful to study which biochemical mechanisms are involved in these degradations.

The fact that slimy sauces, like other slimy solutions such as hagfish slime (Böni, Fischer, Böcker, Kuster, & Rühls, 2016), have remarkable stringy properties suggests that this characteristic could be related to the sensory perception of the slimy texture. An adapted sensory analysis work will have to be carried out in order to validate the existence of such a correlation. If this is confirmed, it will be possible to use the set of measuring methods identified in this work to engineer the texture and the rheology of African slimy sauces.

Acknowledgments

We would like to express our thanks to Mr. and Mrs. Nono (AS Food International) for their support and expertise in the production of traditional okra sauce preparation as well as Nourdène Dhaouadi, an engineering student from Montpellier SupAgro, for her contribution to the experiments.

Ethical statements

The authors declare that they do not have any conflict of interest.

Author contributions

Conceptualization, Methodology, Visualization and Writing – Reviewing and Editing, T.S., M.D., A.C., L.V.; Investigation, Data Curation, Software, Formal Analysis, Writing – Original Draft, T.S.; Supervision and Validation, A.C., M.D., L.V.; Funding Acquisition and Project Administration, A.C.

Afin d'identifier un ensemble de méthodes instrumentales appropriées pour mesurer et caractériser la texture et la rhéologie des sauces gluantes de gombo (action 1, figure 4), 37 suspensions gluantes préparées avec du gombo (sauces et purées) ont été mesurées avec 16 paramètres rhéologiques et texturaux.

Les résultats ont montré que d'un point de vue rhéologique et textural, deux protocoles de mesure étaient nécessaires et suffisants pour caractériser les propriétés mécaniques originales de suspensions gluantes préparées avec du gombo. Leurs propriétés viscoélastiques, rhéofluidifiantes et adhésives étaient bien corrélées avec l'indice de consistance K et l'indice d'écoulement n . Leurs propriétés élongationnelles, cohésives et ductiles étaient bien corrélées avec la mesure instrumentale du filant. Ces mesures sont répétables et leur combinaison a permis de bien discriminer les échantillons en fonction du procédé et de la formulation qu'ils avaient subis.

Suite à ce travail, une analyse sensorielle a été conduite pour évaluer si ces mesures instrumentales étaient adaptées pour prédire la perception sensorielle de la texture gluante (action 2, chapitre 3).

La stratégie suivie a consisté à décrire les caractéristiques sensorielles de différentes sauces gluantes à l'aide d'un panel entraîné et à mesurer leurs propriétés d'écoulement et d'allongement. Des corrélations entre les attributs sensoriels et les mesures instrumentales ont ensuite été recherchées.

Chapitre 3

Chapitre 3: Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) preparations and its correlation with instrumental parameters (Publication n°2)

Timoty SAVOURÉ^{a,b,c}, Manuel DORNIER^a, Isabelle MARAVAL^{a,b}, Antoine COLLIGNAN^{a*}

^a *Qualisud, Univ Montpellier, CIRAD, Institut Agro, Univ Avignon, Univ La Réunion, Montpellier, France*

^b *CIRAD, UMR Qualisud, F-34398 Montpellier, France*

^c *AS Food International, Grenoble, France*

* *Corresponding author.*

Publication parue en 2021 dans la revue « Journal of Texture Studies » (Volume 52, Numéro 3, jtxs. 12583)

Abstract:

Okra (*Abelmoschus esculentus*) is one of the ingredients used in traditional West and Central African gastronomy because of the slimy texture it gives to sauces, soups and stews. However, in the literature, the definition of "sliminess" is unclear, the textural perception of these slimy preparations has not been described, and the possibility of measuring the textural quality of these sauces instrumentally has not been established. This study therefore aims i) to identify the sensory attributes adapted to describe the texture of these slimy sauces and ii) to verify that the instrumental measurements adapted to characterize the rheology and texture of these sauces are well correlated to these attributes. Nine okra sauces were prepared by varying their formulation and the preparation process. A quantitative descriptive sensory analysis and a ranking test were carried out with a trained panel of 16 panellists. The texture of the okra-based slimy sauces prepared can be described using 11 attributes referring to their consistency and to their adhesive, elastic, elongation and functional properties. Results showed that sliminess is a complex textural property resulting from the combined perception of stringiness and viscosity of semi-solid matrices. It is therefore not possible to correctly predict the sensory perception of sliminess with a single instrumental measurement. However, measuring their consistency index K and their stringiness is necessary and sufficient to characterize the texture of these sauces and to predict the sensory perception of their consistency and elongational properties.

Key words:

Sliminess; Stringiness; Okra sauce; Texture prediction; Sensory Analysis; Semi-solid foods

1. Introduction

Like the nuts of *Irvingia gabonensis* (Ndjouenkeu et al., 1996), the bark of *Triumfetta cordifolia* (Woguia et al., 2012), the leaves of *Adansonia digitata* (Woolfe et al., 1977) and *Corchorus olitorius* (Dansi et al., 2008), okra (*Abelmoschus esculentus*) is one of the ingredients used in traditional West and Central African cuisine because of the special consistency it gives to sauces, soups, and stews. However, preservation processes can degrade okra textural properties, which is a major obstacle to the consumption of this vegetable in a stabilized form in Africa (Inyang & Ike, 1998; Savouré et al., 2020; Woolfe et al., 1977).

From a rheological point of view, okra sauces have "structured fluid" properties as well as original visco-elastic, rheofluidifying, adhesive, elongational, ductile and cohesive properties (Savouré et al., 2020). From a sensory point of view, experienced consumers use the adjectives "sliminess", "mucilaginous", "drawable", "stringy", "gum-like", "viscous", "thick", "smooth" and "glue" to describe the texture of these sauces (Falade & Omojola, 2010; Fasogbon et al., 2017; Woolfe et al., 1977). For them, okra slimy properties are the main quality criteria of this vegetable (Inyang & Ike, 1998; Uzo & Ojiako, 1980).

Tableau 5 : Definitions of the slimy and sliminess concepts found in the literature

Term	Definition	Reference
Sliminess	"For organoleptic evaluation, a slimy material was defined as one that is thick, coats the mouth, and is difficult to swallow"	Szczesniak et Farkas (1962)
Sliminess	"Sliminess is a layman's term for the sticky or viscid fluid secreted, for example, by tender okra fruit upon wounding it"	Uzo et Ojiako (1980)
Stickiness	"The product is difficult to clear from the mouth. It forms slimy strings and is difficult to swallow"	Weenen et al. (2003)
Slimy afterfeel	"Degree in which the product leaves a feeling of mucus/slime in the mouth"	Weenen et al. (2003)
Slimy afterfeel	"Degree to which the product leaves a slimy feeling after swallowing. One is inclined to keep on swallowing. It is made up from thick, stringy saliva, sticking together."	Terpstra (2008)
Sliminess	"Sliminess is a major quality characteristics of an <i>Irvingia</i> seed as consumers of the seed prefers the seed with better sliming ability (drawability)."	Azi et al. (2017)

As shown by the different definitions found in the literature (see Tableau 5), and the absence of an international standard associated with sliminess (AFNOR, 2009), a clear definition of this concept does not exist. For example, the definitions of Szczesniak & Farkas (1962), Terpstra (2008) and Weenen et al. (2003) are not consistent with the fact that slimy sauces facilitate the intake of the accompanying starchy dough (Owoeye et al., 1990).

A few studies attempted to measure the sliminess of foods instrumentally, but they are rare and mostly old. In some studies, the shear thinning (Szczeniak & Farkas, 1962; Wood, 1974) or viscous (Richardson et al. 1989) properties of a food were correlated with the perception of sliminess in the mouth. In the one carried out by Uzo & Ojiako (1980), the kinematic viscosity of okra mucilage was correlated with the perception of okra sliminess. In contrast, Terpstra et al. (2009) did not find any instrumental measurement that correlated well with the perceived slimy afterfeel of mayonnaise. These sometimes contradictory results showed no clear and convincing trend as to whether or not the sensory perception of sliminess can be measured instrumentally. In addition, the measurement of viscous properties is probably not sufficient and/or suitable for measuring the texture desired by African consumers since they assess the

quality of a sauce's sliminess by visually evaluating its ability to elongate and form strings (Fasogbon et al., 2017; Leakey et al., 2005; Roulon-Doko, 1996).

Recently, Savouré et al. (2020) showed that from a rheological and textural point of view, two measurement protocols were necessary and sufficient to characterize the original mechanical properties of slimy preparations. Their viscoelastic, shear thinning, and adhesive properties were well correlated with the consistency index K and the flow index n. Their elongational, cohesive and ductile properties were well correlated with the measurement of stringiness. The combination of these protocols made it possible to properly discriminate samples as a function of the process and the formulation they had undergone.

Therefore, the objective of this study was to identify a list of sensory attributes to describe slimy preparations, to assess whether there were significant correlations with the rheological and textural measurements identified by Savouré et al. (2020) and to identify the instrumental measurements that correlated best with the perception of slimy texture. The followed strategy consisted in describing the sensory characteristics of different slimy preparations using a trained panel and measuring their flow and elongational properties. Correlations between sensory attributes and instrumental measurements were then sought.

2. Materials and methods

2.1. Sample preparation

Tableau 6 : Summary of preparation process and formulation of the nine samples used for the study (see Savouré et al., (2020) for an exhaustive description of sample preparation)

Sample Number	Name	Formulation and Processing	pH	Final water content (kg/kg dry matter)	
1	Standardized okra purees	Blanching of fresh okras (90°C / 7 min), seeding, grinding with water (water/okra ratio = ¼), pH adjustment (addition of citric acid or sodium bicarbonate solutions)	7.2	15.8	
2			7.3	25.3	
3			6.4	19	
4			7.1	19.5	
5	Sterilized okra puree	Grinding of fresh okras with seeds, sterilization in tin plated steel cans (121°C / 60 min) up to F0 = 4.2 min	5.7	18.2	
6	Okra sauces	With Nkui	Formulation using 44 % blanched okra puree with Nkui (decoction of frozen <i>Triumfetta pentandra</i> bark)	6.6	26.3
7		With Ogbono	Formulation using 50 % blanched okra puree with Ogbono préparation (ground and cooked dika nut (<i>Irvingia gabonensis</i>) kernels) before final cooking (80°C / 30 min)	5.8	10.1
8		Cameroonian traditional okra sauce recipe	Formulation using 46.9 % of fresh okra (w/w) with 39.4% water, 8.4% onions, 3.5% sunflower oil, 1.0% garlic, 0.5% salt, and 0.3% of "traditional alkaline salt" before final cooking (70°C / 15 min)	6.5	8.8
9	Dried okra sauce	Formulation using 9% dried okra (w/w) with 91% water was cooked during 10 min at 85°C. Then, water content was adjusted.	6.3	18.5	

Nine slimy preparations were prepared by varying the formulation and the preparation process in order to obtain samples with different rheological and textural properties. From a puree of blanched okra, the samples were obtained by modulating their pH and dry matter content (samples 1 to 4), by formulating the product with other slimy ingredients (Ogbono and Nkui) or by making a traditional African recipe (samples 6 to 8). Two samples were obtained by applying a process of preservation to okra, or by sterilizing a fresh okra puree (sample 5), or by cooking dried okra in water (sample 9). After preparation, the samples were vacuum-packed in PE bags and frozen at -18°C before analysis. Table 6 summarizes the formulations

and procedures used for each sample. The preparation methods for all samples are described in detail in the study of Savouré et al. (2020). For the continuation of the article, the term "preparation" will be used to refer to all samples.

2.2. Sensory analysis

2.2.1. General conditions

A quantitative descriptive analysis was carried out to characterize the texture of the nine preparations prepared with okra. The panel was composed of 16 panelists (9 men, 7 women) trained and qualified for sensory analysis (homogeneous and repeatable). Tastings were carried out in a sensory analysis laboratory meeting the requirements of the international ISO 13299 (2010) standards. The panelists tasted in individual tasting booths and in a controlled environment ($45 \pm 3\%$ relative humidity; $23 \pm 1.2^\circ\text{C}$ room temperature).

2.2.2. Setting up of the quantitative descriptive analysis

A workshop with the 16 panelists generated a list of vocabulary to describe the texture of three samples (samples no. 1, 5 and 6) prepared with very different formulations and preparation processes, as indicated in Table 6. This step made it possible to collectively define 11 textural attributes, and to develop an evaluation protocol and a rating scale for each of them (Table 7). Four attributes were first evaluated with a plastic spoon (« Compactness », « Divisibility », « Elasticity - resilience » and « Adhesiveness »). Then the hand was used to assess the attributes « Firmness », « Stringiness », « Seizability » and « Sliminess ». Finally, three attributes (« Lubricating », « Chewiness – work in mouth » and « Thickness ») were assessed in the mouth.

The 11 quantitative attributes were quantified using a unipolar structured-numbered scale with 11 points ranging from 0 to 10, where 0 is « low intensity » and 10 is « high intensity ». Each of the 16 panelists participated in two training sessions to use the sensory attributes and rate the intensity of each attribute on the proposed scale. For each attribute, scale anchors, and reference anchors used during training, are given in Table 7. For the attribute « Sliminess », no definition or measurement protocol was proposed so that each panelist could give their own assessment of this attribute.

2.2.1. Testing procedure

Before each tasting session, a sample of each preparation was thawed and returned to room temperature (25°C). A few minutes before the sensory analysis, one tablespoon of each preparation was placed on a plastic plate. Sample identifiers were coded with 3-digit random numbers.

During each session each panelist tasted 3 samples in a random order. Between consecutive samples, panelists rinsed their mouth with mineral water. Each panelist attended 6 sessions and tasted each sample twice.

2.2.2. Ranking test

At the end of the last session, the 9 samples were distributed at the same time so that each panelist could rank them in ascending order from the least to the slimiest. The panelists were then asked to write down the definition of sliminess and/or the criteria that allowed them to make this ranking.

Chapitre 3: Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) preparations and its correlation with instrumental parameters

Tableau 7 : Definitions and protocols used for the evaluation of the 11 sensory attributes used by the panel to describe the texture of preparations made with okra

Mode of evaluation	Attribute (French term)	Definition	Technique of evaluation	Scale anchors (0-10)	Reference anchors
With a spoon	Compactness (Compacité)	Which forms a block, which has a solid appearance	With the spoon, make a pile of purée as high as possible. Wait 5 seconds. Evaluate the height of this pile.	10 = height of 3 cm 0 = height of 0 cm	
	Divisibility (Sécabilité)	<i>"Mechanical textural attribute related to cohesiveness and hardness and to the force necessary" for a product to be cut or divided into distinct pieces. (1)</i>	Prepare a 0.5 cm thick layer. Dip the side of the spoon vertically into the purée in order to cut a spoonful and to remove it. If the cut-off is clear and there is no need to pull to the side to divide the product, it is divisible. If you have to pull to the side to divide, dip the spoon a 2 nd time and estimate the lateral stretching distance required to completely separate the portion from the rest of the purée.	10 = no need to pull to the side to divide the product 5 = lateral stretching distance required = 3 cm 0 = lateral stretching distance required = 6 cm	0 = Nkui
	Elasticity / resilience (Elasticité / résilience)	<i>"Mechanical textural attribute related to: the rapidity of recovery from a deforming force; and the degree to which a deformed material returns to its original condition after the deforming force is removed." (2)</i>	Prepare a 0.5 cm thick layer. Place the back of the spoon on the preparation and try to spread it 1 cm on the side. Evaluate the distance travelled back by the preparation (retraction).	10 = retracts and returns to its original shape 0 = Does not return at all to its original shape after deformation	10 : Nkui 0 : potato puree
	Adhesiveness (Adhérence)	<i>"Mechanical textural attribute relating to the force required to remove" (peel off) the back of the spoon from the preparation (3)</i>	Level the sample. Take the tip of the (empty) spoon handle between your index finger and thumb. Place the back of the spoon on top of the puree and then, using a lever effect, try to peel it off immediately. Evaluate the force required to remove it from the purée.	10 = sticky (strong resistance) 0 = non-sticky (absence of resistance)	10 : potato puree 0 : Nkui
With the hand	Firmness (Fermeté)	<i>"Mechanical textural attribute relating to the force required to achieve a given deformation, penetration, or breakage of a product" (4)</i>	Prepare a layer of about 1cm thick. While pressing with the index finger the surface of the preparation to the plate, assess the force required to obtain deformation or penetration.	10 = firm 0 = non-ferme (liquid)	10 : potato puree 0 : water
	Stringiness (Filant)	Maximum elongation length before break	Take a third of a spoonful of preparation between your middle finger and thumb. Spread the 2 fingers vertically (speed of about 1cm/s) and estimate the size and length of the filament just before breakage (about 1 point/cm).	10 = length of 10 cm 0 = length of 0 cm	
	Seizability (Saisissabilité)	Ease of taking the sample in hand (quantity)	With your hand facing down, take as much puree as possible with the tip of 4 fingers (thumb, index finger, middle finger and ring finger). Estimate the quantity seized and remaining after 5 sec.	10 = large quantity seized and remaining in hand 0 = small quantity seized and remaining in hand	10: potato puree 5 : Nkui 0 : water
	Sliminess (Gluant)			10 = slimy 0 = non-slimy	
In the mouth	Lubricating (Lubrifiant)	Refers to a product which, once positioned at the interface between two elements, facilitates their movement relative to each other by reducing friction (slipping)	Rotate the product in the mouth and evaluate the ability with which the product facilitates or not the sliding of the tongue against the palate.	10 = Lubricating 5 = natural sliding of the tongue on the palate 0 = sticky	10 : Nkui 0 : Nutella
	Chewiness - work in mouth (Masticabilité - travail en bouche)	<i>"Mechanical textural attribute related to the amount of work required to masticate a solid product into a state ready for swallowing" (5)</i>	Put 1/3 spoonful of the product in the mouth, evaluate the working time required with the tongue before swallowing.	10 = Tender 5 = Melting 0 = Liquid	10 : potato puree 5 : firm yogurt 0 : water
	Thickness (Épaisseur)	<i>"Mechanical textural attribute relating to resistance to flow. It corresponds to the force required to draw a liquid from a spoon over the tongue" (6)</i>	Place the product in half a spoon and measure the force required to suck the product in.	10 = high force required 0 = Low force required	10 : potato puree 0 : water
Definitions in italic are from AFNOR (2009) definitions of fracturability (1), elasticity, springiness and resilience (2), adhesiveness (3), hardness (4), chewiness (5) and viscosity (6)					

2.3. Instrumental measurement methods

Stringiness, flow properties and physico-chemical properties were measured for each sample at room temperature ($25 \pm 1^\circ\text{C}$).

2.3.1. Stringiness measurement

In order to measure the stringiness, a 3-step procedure was used (a drawing of the used experimental set-up is shown in Savouré et al 2020):

- 1) Recording of a stretching test with a camera: After being placed in a steel cylinder (diameter = 3 cm; deepness = 5.2 cm), each sample underwent a relaxation time of 2 min. Then, a Stable Micro Systems TA.XT plus Texture Analyzer equipped with a PVC cylindrical probe (diameter = 2 cm) was used to perform a stretching test (i. probe descent speed = $10 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, ii. 2 mm penetration of the probe into the sample after detection of a 19.6 mN trigger force, iii. probe ascent speed = $40 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$). The 2 mm penetration of the probe into the sample, before stretching, is intended to ensure good adhesion between the probe and the suspension.
- 2) Extraction of the image corresponding to the maximum elongation length of the filament, reached during the probe ascent. To do so, the VLC media player software was used to capture and extract the image from the stretching test film.
- 3) Stringiness measurement with ImageJ2: the image was uploaded into ImageJ2 software (Rueden et al., 2017; Schindelin et al., 2012) to measure the length of the filament prior to rupture.

Each measurement was repeated 15 times for each sample. Stringiness of a sample is the average of the 15 measurements

2.3.2. Flow measurement under steady state conditions

An Anton Paar MCR 301 rheometer equipped with a starch cell (C-ETD160/ST) and a measuring geometry with 3 pairs of blades (ST24-2D/2V/2V-30) was used to realize a flow measurement under steady state conditions (3–5 measurements per sample). The consistency index K and the flow behavior index n was then calculated with Rheoplus software using the Ostwald-de Waele equation (eq. 1).

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (\text{eq. 1})$$

Where :

- τ = shear stress (Pa)
- $\dot{\gamma}$ = shear rate (s^{-1})
- K = flow consistency index ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)
- n = flow behavior index

2.3.3. Physico-chemical measurements

The water content (kg/kg of dry matter) was measured by drying at 105°C for 24 hr. The pH was measured using a TitroLine® 5000 pH meter (SI Analytics, Weilheim, Germany, 2017). Each measurement was performed in triplicate.

2.4. Data processing and statistics

2.4.1. Sorting of scores according to repeatability and homogeneity

The panelists' scores were sorted using criteria of repeatability and homogeneity with the rest of the panel. The standard deviation of the scores assigned to each sample for each given

attribute was calculated for each panelist. When the standard deviation was greater than 2 (on a scale of 0 to 10), the score was not considered repeatable. A panelist was considered non-repeatable for a given attribute if he/she was not repeatable for more than 4 out of 9 samples for that attribute.

For a given attribute, when the absolute difference between the panelist mean and the panel mean was greater than the standard deviation of the panel for a given sample, the panelist was not considered homogeneous with the rest of the panel for that sample. When the panelist was not homogeneous with the rest of the panel for more than 4/9 samples, the panelist's overall scores for the attribute in question was considered non-homogeneous. Non-repeatable and non-homogeneous scores were not used in the analysis of the results. For the sliminess attribute, the criterion of repeatability was applied but not the criterion of homogeneity because this attribute had neither definition nor measurement protocol.

In order to assess the match between the results of the sliminess ranking test and the score given on the sliminess attribute by each panelist, the average score given to each sample for the sliminess attribute was used. Then, the ranking of the nine samples according to these average scores was determined. When the difference between the ranking assigned to a sample in the ranking test and its ranking based on the average score was strictly greater than 2, the perception of the sample's sliminess was not considered repeatable. When a panelist did not have a repeatable perception of the level of sliminess for more than 50% of the samples (> 4/9), the panelist's sliminess ranking test was not considered repeatable.

2.4.2. Data processing and statistics

The software R-3.5.1 (R Core Team, 2018) was used to analyze the data. A 2-factor ANOVA (sample and panelist) was used to characterize the ability of sensory attributes to discriminate samples from each other. As expected, the effect of the panelists was always significant, and was therefore not reported in the table presenting the results of the ANOVA (Table 8). A 1-factor ANOVA (samples) was used to characterize the ability of instrumental parameters to discriminate samples from each other. The Tukey test of agricolae package (de Mendiburu, 2019) was used to find samples that are significantly different from each other. The FactoMineR package (Lê et al., 2008) was used to perform the principal component analysis (PCA). Instrumental parameters are supplementary variables of the PCA and do not contribute to the formation of the components. The corrplot package (Wei & Simko, 2017) was used to produce the Pearson correlation matrix.

To model the relationship between a sensory perception (S) and an instrumental measurement (I) three psychophysical models were tested for each sensory attribute as a function of the consistency index K, the flow behaviour index n or the instrumental measurement of stringiness: a linear model (eq. 3), a Weber-Fechner semi-logarithmic model (eq. 4) and a « power model » (eq. 5):

$$S = a_0 + a_1 \times I \quad (eq. 3)$$

$$S = a_0 + a_1 \times \ln I \quad (eq. 4)$$

$$S = a_0 \times I^n \quad (eq. 5)$$

where a_0 , a_1 and n are constants (Bourne, 2002).

The rankings of the nine samples according to the level of sliminess perceived by the panelists were used to make a Hierarchical Cluster Analysis (HCA) of the panelists using a Euclidean distance, a ward aggregation index and a k-means consolidation. To this end, only the rankings of panelists with repeatable perceptions of sliminess were used. This allowed the

identification of 3 groups of panelists having a similar way of ranking the samples. The HCPC function of the FactoMiner package was used for this purpose (Lê et al., 2008).

3. Results and discussion

3.1. Identification of relevant attributes to describe the texture of slimy preparations

Tableau 8 : Average score (\pm standard deviation) of the panelists on each sensory attribute for the nine slimy preparations and results of the 2-factor ANOVA

Mode of evaluation	With a spoon				With the hand				In the mouth		
	Compactness	Divisibility	Elasticity - resilience	Adhesiveness	Firmness	Stringiness	Seizability	Sliminess	Lubricating	Chewiness-Work in Mouth	Thickness
1	7.9 (0.8) ₁₁ ^a	7.2 (0.7) ₁₁ ^a	1.5 (0.7) ₁₂ ^c	7.1 (1) ₈ ^a	6 (0.8) ₁₁ ^a	2.9 (0.8) ₁₁ ^{cd}	7.5 (0.4) ₁₁ ^a	5 (1.4) ₁₀ ^{bc}	5.9 (0.5) ₁₀ ^c	5.6 (0.5) ₇ ^{ab}	7.5 (0.6) ₁₀ ^a
2	2.6 (0.6) ₁₀ ^f	4.8 (0.7) ₉ ^c	4.1 (1.4) ₈ ^{bc}	3.5 (1) ₇ ^c	2.7 (0.5) ₁₁ ^d	3.4 (0.7) ₈ ^c	4.2 (1.1) ₁₀ ^{cd}	5.5 (1.5) ₁₂ ^{ab}	6.5 (0.5) ₁₁ ^{bc}	4 (0.9) ₁₀ ^{de}	3.9 (0.7) ₁₃ ^{de}
3	5 (0.9) ₁₁ ^c	6 (0.6) ₁₂ ^b	3.3 (1) ₈ ^{cd}	5.7 (1) ₁₁ ^b	4.7 (1.1) ₁₀ ^b	3.7 (0.8) ₈ ^{bc}	6.7 (0.6) ₁₀ ^a	5.4 (1.4) ₁₂ ^{ab}	6.7 (0.6) ₁₂ ^{ab}	5.2 (0.9) ₉ ^{bc}	6.3 (0.4) ₉ ^b
4	4.2 (0.8) ₁₁ ^{cd}	5.9 (0.8) ₁₁ ^b	3.8 (1.3) ₁₀ ^{cd}	4.5 (1.4) ₈ ^c	3.9 (0.9) ₈ ^{bc}	2.9 (1.2) ₁₁ ^{cd}	5.6 (0.7) ₈ ^b	5.6 (2) ₁₃ ^{ab}	6 (0.7) ₁₂ ^{bc}	4.9 (0.9) ₉ ^{bcd}	5.1 (0.9) ₈ ^c
5	3.1 (0.6) ₁₁ ^{cd}	5.9 (1.2) ₁₀ ^b	2.4 (1.1) ₈ ^{de}	4 (1.4) ₁₀ ^c	2.5 (0.7) ₉ ^d	0.9 (0.7) ₁₃ ^c	4.2 (1) ₈ ^{cd}	2.2 (1.1) ₆ ^d	5 (0.7) ₁₁ ^d	3.6 (1.2) ₇ ^e	3.8 (1.2) ₁₀ ^d
6	3 (0.7) ₁₀ ^{cd}	4.1 (1.1) ₁₁ ^c	7.1 (0.9) ₁₀ ^a	3.5 (0.8) ₈ ^c	2.7 (0.3) ₁₀ ^d	5.8 (1.2) ₈ ^a	4.1 (0.7) ₁₁ ^d	7 (1.5) ₁₅ ^a	6.9 (0.8) ₁₁ ^a	4.3 (1) ₁₁ ^{cd}	4.3 (0.8) ₁₁ ^{de}
7	3.8 (0.7) ₁₀ ^{de}	4.6 (1) ₁₀ ^c	5.4 (0.5) ₇ ^b	3.4 (0.6) ₈ ^c	3.4 (0.7) ₁₀ ^{cd}	4.6 (1.2) ₈ ^b	5.1 (0.8) ₁₁ ^{bc}	6.5 (1.2) ₁₀ ^{ab}	6.5 (0.5) _{11abc}	4.9 (0.6) ₉ ^{bcd}	4.9 (0.9) ₁₂ ^{cd}
8	7 (0.4) ₁₀ ^b	7.7 (0.5) ₁₂ ^a	2.3 (1.5) ₁₀ ^{de}	7.1 (0.9) ₁₂ ^a	6.6 (0.8) ₈ ^a	6.4 (0.9) ₈ ^a	7.4 (0.7) ₁₀ ^a	6.2 (2.4) ₁₀ ^{ab}	6.8 (0.9) ₁₁ ^a	6.6 (0.8) ₈ ^a	7.5 (0.6) ₈ ^a
9	1 (0.5) ₁₁ ^a	2.4 (1.7) ₈ ^d	7.6 (1.5) ₈ ^a	1.8 (0.9) ₁₂ ^d	0.9 (0.4) ₈ ^e	1.9 (1) ₁₃ ^{de}	1.2 (0.5) ₁₀ ^e	3.5 (1.9) ₁₅ ^{cd}	5.1 (0.7) ₁₂ ^d	1.9 (0.7) ₇ ^f	2.1 (0.7) ₁₀ ^f
Difference between the maximum and the minimum score	6.9	5.3	6.1	5.3	5.7	5.5	6.3	4.8	1.9	4.7	5.4
Average standard deviation	0.7	0.9	1.1	1.0	0.7	0.9	0.7	1.6	0.7	0.8	0.8
Average number of valid panelists (/16)	10.1	10.4	8.1	9.7	9.6	10.1	10.0	12.8	11.2	8.8	10.2
p-value of sample factor	1.69 × 10 ⁻³⁸	3.3 × 10 ⁻²⁷	3.87 × 10 ⁻¹⁹	3.53 × 10 ⁻²⁵	3.63 × 10 ⁻³¹	4.33 × 10 ⁻²⁹	6.6 × 10 ⁻³⁶	4.2 × 10 ⁻¹⁶	8.99 × 10 ⁻¹⁷	2.12 × 10 ⁻¹⁸	7.24 × 10 ⁻²⁹

^{a-f} indices indicate the number of valid panelists for a sensory attribute on a sample

^{a-g} Means with the same letter in one column indicate that, for the considered attribute, the corresponding samples are not significantly different (P < 0.05).

Table 8 presents the attributes identified by the panel and used to describe the texture of okra preparations as well as the corresponding definitions and measurement protocols.

The terms « seizability » and « divisibility » are original to describe the texture of foods as evidenced by their absence from the vocabulary lists of Nishinari et al. (2008) and AFNOR (2009). « Seizability » and « divisibility » of slimy sauces are important technical properties for African consumers since they consume these sauces by hand. They must therefore be able to manually take a sufficient quantity of the sauces without them running through their fingers (Roulon-Doko, 1996). These two attributes are probably related to sauce cohesiveness (« *mechanical textural attribute relating to the degree to which a substance can be deformed before it breaks, including the properties of fracturability, chewiness and gumminess* » (AFNOR, 2009)). Indeed, these sauces must be cohesive enough to be seizable but not so cohesive that they can be divided by hand.

« Thickness » and « adhesiveness » are two attributes commonly used to describe the texture of semi-solid food, including sauces. However, the other attributes listed in Table 7 are to our knowledge rarely if ever used to describe the texture of sauces. This is the case of the attributes « chewiness - work in mouth », « elasticity - resilience » and « firmness » which are rather applied to characterize solid foods that need to be chewed before being swallowed (AFNOR, 2009; Nishinari et al., 2008). The attribute « compactness » has already been used

in association with thickness by Weenen et al. (2003) to describe the texture of semi-solid foods. The use of these four attributes to characterize the texture of our samples is explained by the fact that some preparations were very slightly diluted and were therefore very consistent (consistency index K of sample n°1 and 8 > 100 Pa.sⁿ; Table 5). Moreover, the use of these four attributes is justified by the fact that for African consumers, the thickness of a slimy sauce is a quality, but a sauce that is too compact is undesirable (Roulon-Doko, 1996). A good slimy sauce is therefore not a firm, solid, dense and brittle gel, but rather a flexible, ductile fluid that is easy to seize with the hands and swallow in mouth. These four attributes seem adapted to apprehend these different nuances.

To our knowledge, the attribute « stringiness » has never been used to describe the texture of sauces. It has so far mainly been used to describe the texture of natto (Feng et al., 2015), processed cheese or yoghurt (Nishinari et al., 2008). However, according to Roulon-Doko (1996), in the language of the Gbaya'bodoe, in Cameroon, to describe the amount of sliminess in a sauce and to talk about the slimy power of a plant, the verb « to lengthen, to be long » is used. The term stringiness appears to be equivalent to the term "drawability" used by Fasogbon et al. (2017) and Leakey et al. (2005) to describe the elongational properties of slimy sauces. Therefore, this attribute seems particularly interesting for the description of slimy sauces texture. We note that like « divisibility », the definition of « stringiness » is close to that of « cohesiveness ».

In the same way, to our knowledge, the term « lubricating » has never been used to describe the texture of sauces. However, its definition is close to the one of "slipperiness" which can be used to describe sauces and fluids (see for example Bengtsson et al. (2011) and Kim et al. (2017)). One of the roles of a slimy sauce is to facilitate the absorption of starchy dough, consumed as a main course, by making it slide more easily on the palate (Hincker, 2005; Owoeye et al., 1990).

In addition to being consistent with the vocabulary used by African consumers to describe the texture of their sauces, the sensory attributes used are in line with the rheological and textural properties of slimy okra purees and sauces that were identified by Savouré et al. (2020). Thus, the attributes « compactness », « elasticity - resilience », « firmness », « seizability », « chewiness - work in mouth » and « thickness » seem to correspond to the more or less solid properties of okra preparations. The attributes « stringiness » and "divisibility" correspond to the elongational, ductile and cohesive properties and the attribute "adhesiveness" to their adhesive properties. But none of the rheological or instrumental measures identified by Savouré et al. (2020) seem to correspond to the « lubricating » attribute.

3.2. Quality and differentiating power of sensory attributes

In Table 8, the p-value of all the attributes is less than 1%, which means that all nine samples can be differentiated from one another according to their texture.

3.2.1. Quality of sensory attributes

The difference between the maximum and the minimum score, the average standard deviation and the average number of valid panelists are indicators of difficulty the panel had in scoring each attribute. It can be seen that the average number of valid panelists is close to the minimum set by the laboratory, to obtain a robust result (8 panelists out of 16), for the attributes « elasticity - resilience » (Average number of valid panelists = 8.1) and « chewiness - work in mouth » (Average number of valid panelists = 8.8). This means that for these two attributes, the panelists were less repeatable and the panel less homogeneous than for the other

attributes. This is particularly the case for the attribute « elasticity - resilience » for which the number of valid panelists is less than or equal to 8 for 7/9 samples. In particular, the panel had great difficulty scoring the « elasticity - resilience » of the sample 8 (number of valid panelists = 5). In contrast, for the attributes « compactness », « divisibility », « stringiness », « seizability » and « thickness », the panelists were more repeatable and the panel more homogeneous (number of valid panelists >10). These results may indicate that evaluation protocols of attributes « elasticity - resilience » and « chewiness - work in mouth » were not adapted and/or too complicated. Supplementary training sessions would have been necessary to improve their quality.

We notice that the difference between the maximum and the minimum score is higher than 5 for all attributes except for the attributes « sliminess », « lubricating » and « chewiness - work in mouth ». For these three attributes, the scale was therefore not used in its full range, which means that the range was too large. The difference between the maximum and the minimum score for the attribute « lubricating » is particularly small (1.9), indicating that only 1/5th of the scale was used by the panel for this attribute. No sample was found to score less than 5. However, in the indicated scale this score corresponds to the « natural sliding of the tongue on the palate » and scores below 5 are sticky. No sample was therefore perceived as sticky in the mouth. Therefore, for the « lubricating » attribute, it would probably have been better not to include the perception of « stickiness » in the mouth for the lower half of the scale and to indicate to the panel that the « natural sliding of the tongue on the palate » should be scored 0.

For the "sliminess" attribute, the mean standard deviation is higher (1.6) than for the other attributes. This is due to the fact that for this attribute, the criterion of homogeneity with the rest of the panel was not used and that only a sorting of repeatable scores was performed. Indeed, no definition or evaluation technique had been specified for the "sliminess" attribute (Table 7). This may explain why, for this attribute, the difference between the maximum and minimum score (4.8) is lower than most of the other attributes. The lack of definition and protocol may explain why sliminess of some samples was very difficult for the panel to score. This is especially the case of sample 8 for which the standard deviation is 2.4 and for which only 10 /16 panelists were repeatable (see section 3.5 for the interpretation of this finding).

3.2.2. Differentiating power of sensory attributes

In Table 8, we note that the « stringiness » is the highest for the three « okra sauces » (nos. 6, 7 and 8). Moreover, although they have comparable water contents (Tableau 6), sample nos. 3, 5 and 9 have completely different levels of « compactness », « adhesiveness », « firmness », « stringiness », « seizability », « sliminess », « lubrication », « chewiness - work in mouth » and « thickness ». For each of these attributes, the fact that the puree made with blanched okra (sample no. 3) scores higher than the sterilized sample (no. 5) and the sample prepared from dried okra (no. 9) reveals that the impact of the process on the textural properties of okra is well perceived sensorially.

Comparison of the three « standardized okra purees » for which the pH is identical (nos. 1, 4 and 2), but for which the water content varies, indicates that the increase in water content decreases the sensory perception of « compactness », « adhesiveness », « firmness », « seizability », « chewiness - work in mouth » and « thickness » of okra purees but not « stringiness », « sliminess » or « lubricating ».

In Table 8, we see that the most difficult samples to divide with the spoon are sample 9 prepared with dried okra (« divisibility » = 2.4) and samples 6 and 7 prepared with other slimy ingredients (divisibility respectively equal to 4.1 and 4.6). The low « divisibility » of samples 6

and 7 seems to be related to the « elasticity - resilience » properties that are very important for these 2 samples: the samples that tend to « retract and return to its original shape » (high elasticity - resilience) are also those for which panels needed to pull the preparation to the side to divide it (low divisibility).

These results reveal that the effects of process and formulation on rheological and textural properties, which have been instrumentally measured and described by Savouré et al. (2020), are well perceived sensorially.

3.3. Correlation of sensory attributes with each other and with instrumental parameters

3.3.1. Correlation of sensory attributes with each other

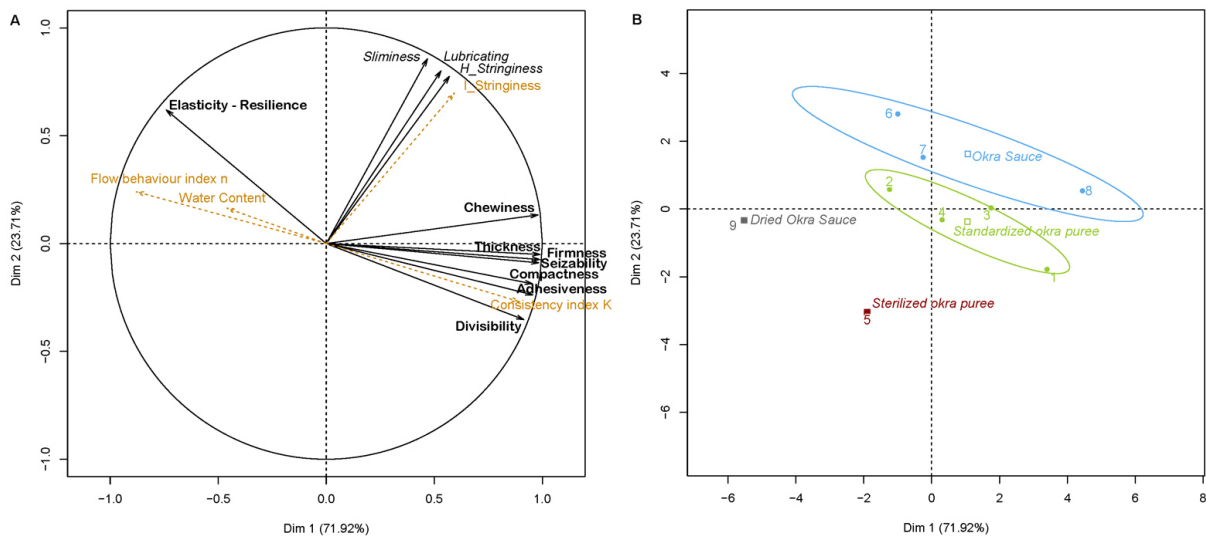


Figure 16 : Principal Component Analysis (PCA) bi-plot of the 11 sensory attributes and the nine samples. On the variable factor map (A), sensory attributes are represented with black continuous arrows: attributes correlated with the “consistency dimension” are in bold whereas those correlated with the “stringy dimension” are in italic. Orange dashed arrows corresponds to supplementary variables. The add of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand (*H_Stringiness*) to be distinguished from the instrumental measurement (*I_Stringiness*). On the projection of individuals (B), confidence ellipses were traced around the categories of samples with a confidence level of 0.99. Numbers correspond to samples

On the PCA of Figure 16, we can see that a two-dimensional space allows us to represent 95.63% of the variance carried by the 11 sensory attributes. The first dimension of the PCA (Figure 16A) correlates well ($p < 5\%$) with the attributes « thickness » ($r = 0.99$), « firmness » ($r = 0.99$), « seizability » ($r = 0.98$), « chewiness - work in mouth » ($r = 0.98$), « adhesiveness » ($r = 0.96$), « compactness » ($r = 0.95$), « divisibility » ($r = 0.91$) and « elasticity - resilience » ($r = -0.74$). Therefore, the first dimension can be interpreted as a dimension that is positively correlated with the perception of consistency, adhesiveness and elasticity - resilience of slimy preparations. For the rest of this article, we will refer to all these attributes using the term consistency. Some causal links can be deduced from the correlations between these consistency attributes. The more compact, firm and thicker the preparations, the easier to seize them by hand but the more chewing work is necessary before swallowing. In addition, the increased « compactness » of preparations makes it easier to divide them into two separate pieces with a spoon (« divisibility »). However, the increase in the « elasticity - resilience » of preparations makes it more difficult to divide them into two separate pieces with a spoon.

The correlation of « water content » with the first dimension ($r = -0.46$) is not significant at the 5% threshold. This indicates that water content is not the only determinant of this dimension and that other factors, such as process and ingredients, have an effect on the perception of consistency attributes.

The second dimension of PCA is well correlated ($p < 5\%$) with the variables « sliminess » ($r = 0.86$), « stringiness » ($r = 0.80$) and « lubricating » ($R = 0.78$). The fact that these three attributes are close to each other indicates that they are well correlated together. This means that the slimiest preparations are the stringiest and the most lubricating.

3.3.2. Differentiating power of the « consistency » and « stringy » dimensions

The meaning given to the two PCA dimensions allows the characterization of differences between samples (Figure 16B). The second dimension makes it possible to clearly distinguish three groups of samples according to their slimy, stringy and lubricating texture: the « okra sauce » type samples, the « standardized okra purée » type samples, the « dried okra sauce » sample (No. 9) and the sterilized sample (No. 5). The first dimension allows samples of the same type to be differentiated according to their consistency.

By describing the consistency, the adhesive properties and the elasticity - resilience of the slimy preparations in combination with their elongational properties, it is therefore possible to clearly distinguish okra preparations from each other. If we compare the two samples which have undergone a preservation process (Nos. 5 and 9) with a sample of comparable water content but which has not undergone a preservation process (No. 3, see Table 6), it appears that the preservation process (sterilization or drying) degrades the consistent and stringy texture of okra in the preparations.

From a sensory point of view, two dimensions seem therefore sufficient to characterize the texture of slimy preparations and are necessary to differentiate them. This result is a sensory confirmation of the results and proposals of previous work carried out with instrumental approaches where the combined study of viscous and elongational properties is the best way to describe the textural properties of slimy suspensions (Leakey et al., 2005; Savouré et al., 2020; van Vliet, 2002; Yuan et al., 2018).

3.3.3. Correlation of instrumental parameters with sensory attributes

For all 9 samples, the measured values of the three instrumental variables that were identified as necessary and sufficient to characterize the original rheological properties of slimy suspensions (Savouré et al., 2020) are presented in Tableau 9. These three variables were projected as supplementary variables on the PCA of the sensory attributes (Figure 16A). The first dimension of PCA is positively correlated with the consistency index K ($r = 0.89$) and negatively correlated with the flow behaviour index n ($r = -0.88$). This means that the most consistent and shear thinning preparations are also those that are perceived to be thickest, firmest, the most seizable, compact, adhesive, and divisible, as well as the least elastic - resilient.

Chapitre 3: Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) preparations and its correlation with instrumental parameters

Tableau 9 : Average measured value (\pm standard deviation) on each instrumental parameter for the nine slimy preparations and results of the 1-factor ANOVA

Sample Number	Stringiness (cm)	K (Pa.s ⁿ)	n
1	3.8 (0.17) ^e	137 (9.7) ^a	0.258 (0.012) ^e
2	4.7 (0.38) ^d	22 (3.5) ^e	0.426 (0.019) ^b
3	4.5 (0.2) ^d	66 (3.4) ^c	0.318 (0.008) ^d
4	4.3 (0.22) ^{de}	47 (3.5) ^d	0.355 (0.009) ^c
5	1.6 (0.13) ^g	31 (4.7) ^e	0.329 (0.018) ^{cd}
6	6.7 (0.77) ^b	26 (1.4) ^e	0.401 (0.004) ^b
7	6.2 (0.36) ^c	32 (2.6) ^e	0.423 (0.01) ^b
8	9.4 (0.72) ^a	107 (5.2) ^b	0.283 (0.005) ^e
9	2.5 (0.1) ^f	4 (0.6) ^f	0.653 (0.012) ^a
p-value of sample factor	9.53×10^{-84}	8.3×10^{-27}	3.91×10^{-26}
Fvalue of sample factor	426	356	319

^{a-g} Means with the same letter in one column indicate that, for the considered instrumental parameter, the corresponding samples are not significantly different ($P < 0.05$).

In Figure 17, we can see that the correlation intensity of K and n with the sensory attributes of the first dimension of the PCA (top left) are respectively between 0.8 and 0.98 for K and between 0.83 and 0.94 for n. By measuring the flow of okra purées, it seems therefore possible to predict the sensory perception of their consistency by consumers.

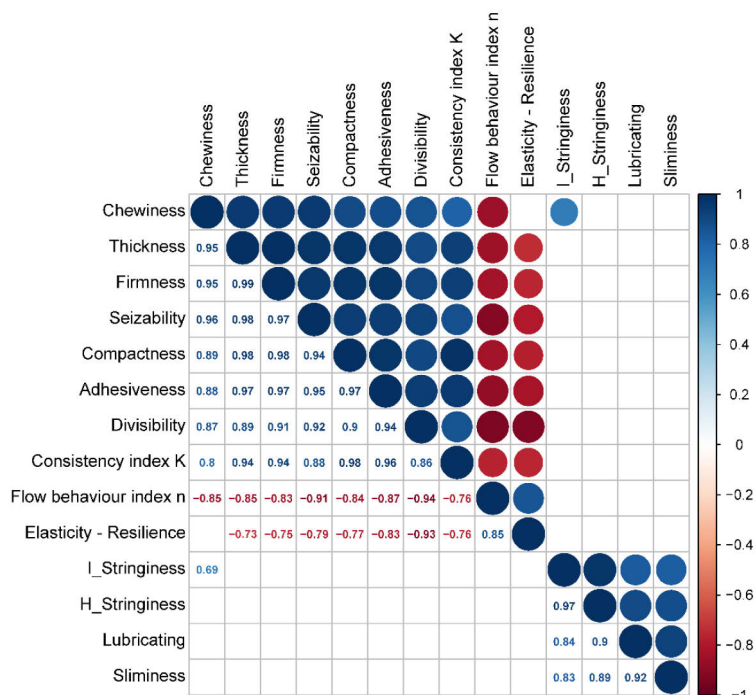


Figure 17 : Matrix of Pearson correlation coefficients of the 11 sensory attributes and the three instrumental parameters. Values of Pearson correlation coefficients significant at the 5% threshold are indicated on the lower left half. Graphical representation of these coefficients is shown on the upper right half: colors indicate the sign of the correlation while the intensity of the color and the size of the disks represent the intensity of their correlation. The addition of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand (H_Stringiness) to be distinguished from the instrumental measurement (I_Stringiness).

The second dimension of PCA is well correlated with the instrumental measurement of stringiness ($r = 0.70$). In Figure 17, we can see that its correlation with the sensory perception of « stringiness », « lubricating » and « sliminess » is 0.97, 0.84 and 0.83 respectively. Therefore, by instrumentally measuring the stringiness of okra preparations, it seems possible to predict these three sensory attributes. Interestingly, the very good correlation ($r > 0.85$) between these three attributes is in line with the lubricating properties attributed to slimy sauces (Hincker, 2005; Owoeye et al., 1990) and the fact that African consumers assess the quality of a slimy sauce by visually assessing its ability to form strings, stretch, and « draw » (Fasogbon et al., 2017; Leakey et al., 2005; Roulon-Doko, 1996).

3.4. Prediction of sensory attributes with instrumental parameters

3.4.1. Identification of best predicting models

Table 10 and Figure 18 present the results of the linear, semi-logarithmic and logarithmic regressions that were carried out to predict the 8 sensory attributes of the consistency dimension with K and n, and to predict the 3 sensory attributes of the sliminess dimension with the stringiness measurement. Since there is no sense in trying to predict the perceptions of « adhesiveness », « elasticity - resilience » and « lubricating » with instrumental measurements of K, n, or stringiness, the results of these regressions are not presented.

In general, for the attributes of the consistency dimension (« compactness », « firmness », « thickness », « seizability », « chewiness » and « divisibility »), models as a function of K were of better quality than models as a function of n (better R^2). Moreover, the physical meaning of the relationship with K is more obvious than with n. Furthermore, the results of Savouré et al. (2020) show that the correlation of K with other rheological and textural variables is better and that the amplitude of its measurement range is greater than that of n. Therefore, for these attributes, only the regressions as a function of K are presented in Table 10 and Figure 18. This choice makes it possible to have only one variable to measure to evaluate each of the two textural and rheological dimensions of slimy preparations.

3.4.1. Quality of predicting models

In Table 10 and Figure 18A, B, C, D, E and F, we can see that the logarithmic regressions of the three sensory attributes of consistency (« compactness », « firmness » and « thickness ») as a function of K are of excellent quality ($R^2 > 0.90$). The quality of the semi-logarithmic regressions as a function of K is very good ($R^2 > 0.85$) for « divisibility » and « chewiness » and excellent for « seizability » ($R^2 = 0.971$). This indicates that the measurement of slimy preparations with the consistency index K makes it possible to accurately predict the perception of their consistency whether with a spoon (« compactness »), with the hand (« firmness ») or in the mouth (« thickness »). The consistency index K also predicts three important functional qualities of slimy sauces: their ability to be divided (« divisibility »), their ability to be seized manually (« seizability ») and their ability to be swallowed easily (« chewiness »). These results are in line with those of other authors who have shown that thickness perception in-the-mouth is highly correlated with viscous properties of preparations (He et al., 2016; Richardson et al., 1989).

In Table 10 and Figure 18H, we can see that the quality of the linear regression of « stringiness » perception as a function of the instrumental measure of stringiness is excellent ($R^2 = 0.947$). Similar to cosmetic products (Gilbert et al., 2013), this result shows that the test that instrumentally mimics the sensory evaluation of stringiness is very good at predicting this perception.

Chapitre 3: Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) preparations and its correlation with instrumental parameters

Tableau 10 : Statistics of the best-fitted models obtained for each sensory attribute (S) with an instrumental parameter (I) for the nine samples.

Sensory Attribute	Instrumental Parameter	Regression type	Regression equation	R ²	Corresponding chart
Compactness	Consistency Index K	Logarithmic	$S = 0.44^* \times I^{0.587^*}$	0.992	Fig3A
Firmness	Consistency Index K	Logarithmic	$S = 0.43^* \times I^{0.565^*}$	0.938	Fig3B
Thickness	Consistency Index K	Logarithmic	$S = 1.22 \times I^{0.377^*}$	0.961	Fig3C
Divisibility	Consistency Index K	Semi-Logarithmic	$S = 0.104 + 1.48^* \times \ln(I)$	0.893	Fig3D
Seizability	Consistency Index K	Semi-Logarithmic	$S = -1.66^* + 1.89^* \times \ln(I)$	0.971	Fig3E
Chewiness	Consistency Index K	Semi-Logarithmic	$S = 0.232 + 1.21^* \times \ln(I)$	0.879	Fig3F
Sliminess	Stringiness	Semi-Logarithmic	$S = 1.28 + 2.68^* \times \ln(I)$	0.887	Fig3G
Stringiness	Stringiness	Linear	$S = 0.04 + 0.735^* \times I$	0.947	Fig3H

* : significant effect (p-value < 5%)

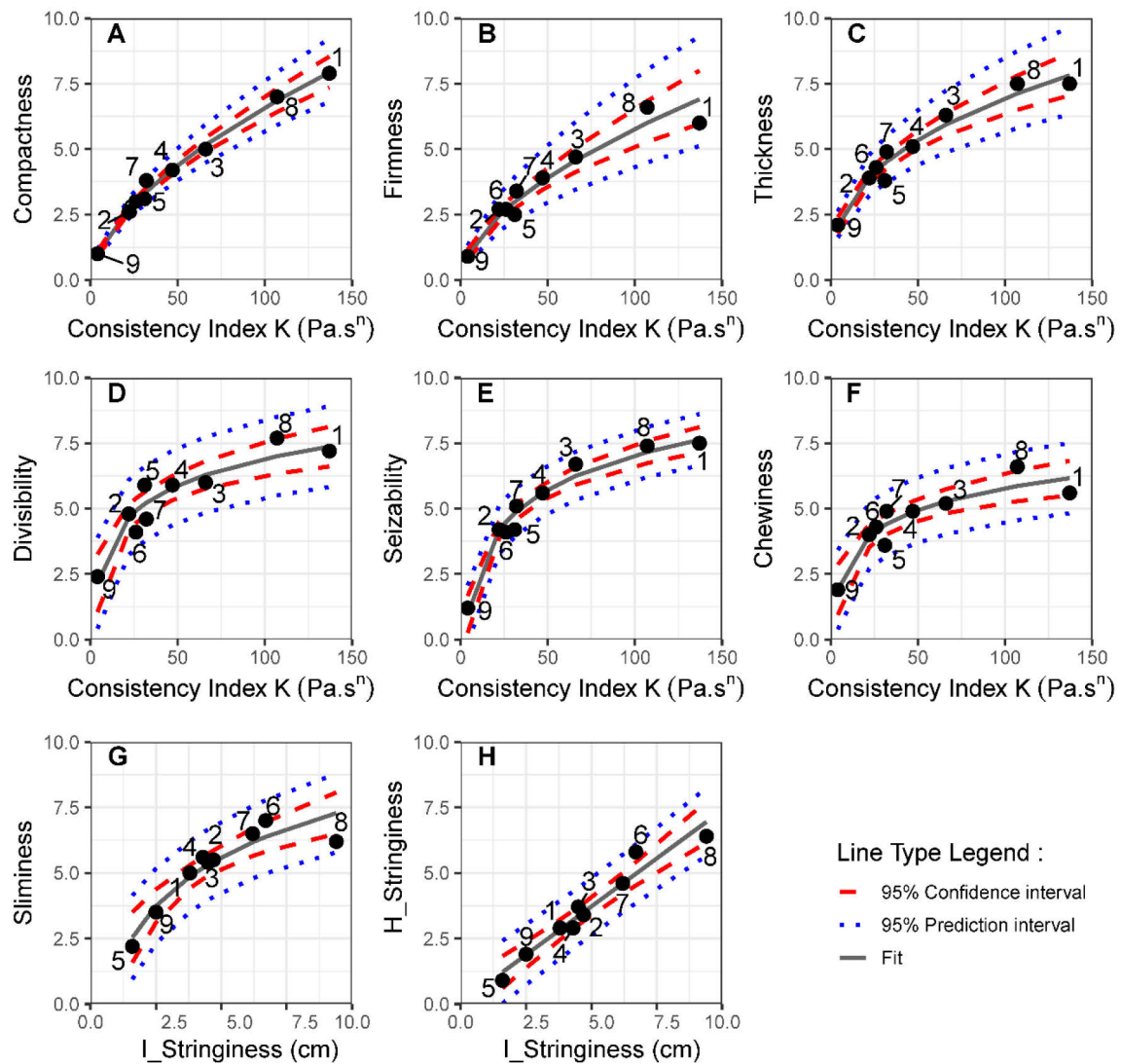


Figure 18 : Charts of the best fitted models obtained for each sensory attribute with an instrumental parameter (for the nine samples). On each plot, point numbers correspond to samples numbers. The addition of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand (H_Stringiness) to be distinguished from the instrumental measurement (I_Stringiness).

3.4.2. « Sliminess » predicting model

In Table 10 and Figure 18G, we see that the regression of « sliminess » as a function of the instrumental measurement of stringiness in a semi-logarithmic model is very good ($R^2 = 0.887$). Since neither definition nor test protocol was defined for « sliminess », this means that in scoring this attribute, the panel mainly took into account the elongational properties of the samples. Therefore, the quality of this regression suggests that the stringiness measurement is suitable for predicting the sliminess perception.

Nevertheless, in Figure 18G, we notice that for sample 8, contrary to the other 8 samples, the sliminess score is at the limit of the prediction interval. Not taking sample 8 into account in the construction of the three regressions of « sliminess », as a function of stringiness measurement, would significantly increase the quality of the correlations, since the R^2 would increase from 0.684 to 0.955 for the linear regression, from 0.724 to 0.992 for the semi-logarithmic regression and from 0.887 to 0.964 for the logarithmic regression. However, this sample cannot be excluded as it is one of the reference samples. Thus, these results show that contrary to the other 8 samples, the instrumental measurement of stringiness is not sufficient to predict the sliminess perception of sample no. 8.

Comparison of the characteristics and the sensory perception of sample no. 8 with those of the other samples leads to suppositions about the reasons for this gap. According to the result of the regression of « sliminess » versus stringiness measurement, the stringiest a sample is, the slimiest it is perceived to be. Since sample 8 is stringier (9.4 cm) than sample 6 (6.7 cm), sample 8's « sliminess » score should be higher than that of sample 6. However, Figure 18G shows that this is not the case and that sample 8 is even perceived (Table 8) as slightly less slimy (« sliminess » = 6.2) than sample 6 (« sliminess » = 7.0). The main difference between these two samples (Table 9) is that the consistency of sample 8 is much greater ($K = 107 \text{ Pa.s}^n$) than that of sample 6 ($K = 26 \text{ Pa.s}^n$). This seems to indicate that consistency affects the perception of sliminess. Nevertheless, while they have an equivalent level of stringiness (3.8 and 4.3 cm respectively) but very different consistency index K values (137 and 47 Pa.s^n respectively), the difference in the perception of sliminess in samples 1 and 4 is very small (5 and 5.6 respectively). These contradictory results show that the effect of consistency on the perception of sliminess is ambiguous. It is possible that for very stringy preparations, there is a consistency threshold beyond which the perception of sliminess decreases with increasing consistency.

In Table 8, it can be seen that with sample 1, sample 8 is the one for which there are the fewest repeatable panelists for the sliminess attribute (10 repeatable panelists). However, these two samples are those for which the consistency index K (Table 9) is the highest. It therefore means that the high consistency of samples 1 and 8 could explain the lowest repeatability of sliminess assessment by the panelists.

In Table 8, the standard deviation (σ) is an indicator of the homogeneity of the scores of all the panelists. Looking at the standard deviations (in brackets) of the « sliminess » attribute, it can be seen that the panel has no difficulty in assessing the sliminess of samples slightly consistent and slightly stringy ($\sigma_{\text{sample 9}} = 1.9$; $\sigma_{\text{sample 5}} = 1.1$), highly consistent and slightly stringy ($\sigma_{\text{sample 1}} = 1.4$) and slightly consistent and highly stringy ($\sigma_{\text{sample 6}} = 1.5$; $\sigma_{\text{sample 7}} = 1.2$). In contrast, the standard deviation of sample 8, which is very consistent and very stringy, is much higher ($\sigma_{\text{sample 8}} = 2.4$) than for the other samples (Average standard deviation = 1.6). Therefore, it is the combination of a high level of stringiness with a strong consistency that seems to make it difficult for the panel to evaluate the « sliminess ».

Although the prediction model of sliminess perception as function of stringiness measurement is of good quality, these results show that the stringiness measurement is not sufficient to correctly predict the perception of sliminess. Indeed, it seems that panelists struggled to assess the sliminess of stringy samples which are very consistent. For that reason, analyzing the ranking test results seems necessary to better understand what the perception of sliminess is related to.

3.5. Ranking of samples according to sliminess

3.5.1. Clusters of panelists with similar way of ranking samples according to sliminess

Tableau 11 : Panelists' ranking of samples according to their sliminess level. For each sample, the difference between the rank in this ranking test and the rank of the nine samples according to the average score of sliminess attributed by each panelist is indicated in brackets. When this difference is strictly superior to 2 for one sample, the perception of sliminess for this sample by the panelist is considered not repeatable. Panelists for whom the perception of sliminess is not repeatable for more than 4/9 of samples were grouped together. The other panelists were grouped by cluster from the ascending hierarchical classification.

Cluster	Panelist ID	Sample Number									Number of samples for which a panelist does not have a repeatable perception of sliminess
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	6	4 (1)	6 (0)	9 (1)	8 (1)	2 (1)	7 (2)	5 (0)	3 (1)	1 (1)	0
	9	4 (1)	8 (3)	3 (1)	6 (0)	2 (1)	9 (0)	7 (0)	5 (3)	1 (1)	2
	12	1 (0)	6 (1)	4 (0)	5 (1)	2 (0)	8 (1)	9 (2)	3 (0)	7 (1)	0
	16	4 (1)	7 (1)	5 (3)	6 (3)	1 (0)	9 (2)	8 (0)	3 (6)	2 (2)	3
2	1	6 (3)	4 (0)	5 (0)	3 (4)	1 (0)	8 (1)	7 (1)	9 (3)	2 (0)	3
	3	6 (1)	3 (2)	5 (2)	4 (0)	1 (0)	8 (2)	7 (1)	9 (0)	2 (0)	0
	4	6 (2)	3 (2)	4 (2)	7 (0)	1 (0)	8 (0)	9 (6)	5 (4)	2 (0)	2
	5	3 (0)	4 (0)	6 (1)	5 (2)	1 (0)	8 (0)	7 (2)	9 (3)	2 (0)	1
	14	4 (1)	3 (1)	6 (1)	5 (3)	1 (0)	8 (2)	7 (2)	9 (6)	2 (0)	2
	15	6 (3)	3 (4)	4 (0)	5 (1)	1 (0)	9 (0)	8 (0)	7 (2)	2 (0)	2
3	2	8 (5)	4 (0)	7 (2)	6 (1)	2 (1)	3 (5)	5 (1)	9 (7)	1 (8)	4
	10	9 (2)	5 (0)	6 (4)	7 (3)	2 (1)	3 (5)	4 (2)	8 (1)	1 (2)	3
	11	9 (7)	3 (2)	7 (1)	6 (2)	2 (1)	5 (3)	4 (3)	8 (1)	1 (2)	3
Non-repeatable panelists	7	1 (6)	5 (4)	7 (3)	8 (3)	2 (1)	9 (1)	6 (3)	4 (2)	3 (1)	5
	8	3 (5)	5 (2)	7 (3)	9 (8)	6 (3)	8 (2)	2 (3)	4 (5)	1 (1)	6
	13	8 (3)	3 (3)	7 (4)	6 (4)	2 (1)	4 (3)	5 (3)	9 (0)	1 (3)	7
Average rank		5.1	4.5	5.8	6.0	1.8	7.1	6.3	6.5	1.9	
Rank standard deviation		2.6	1.6	1.6	1.5	1.2	2.1	1.9	2.5	1.5	
Number of panelists who do not have a repeatable perception of sliminess		7	4	5	7	1	4	5	8	2	

Table 11 presents the ranks assigned to the nine samples by the 16 panelists according to their level of sliminess. In the last column, it can be seen that the sliminess perception was not repeatable for three panelists (no. 7, 8 and 13). In the last row, we observe that the panelists had no difficulty in perceiving the level of sliminess of samples no. 5 (sterilized) and 9 (dried okra sauce) since only 1 and 2 panelists out of 16 are respectively not repeatable for these samples. In contrast, the number of non-repeatable panelists for samples no. 1, 4 and 8 is greater than or equal to 7. This means that the panelists had difficulty perceiving the level of

sliminess for these samples. It is difficult to explain why the panelists are not repeatable for sample 4 because this sample does not have any remarkable characteristics (Table 9). However, the fact that two of these three samples (no. 1 and 8) correspond to the most consistent samples ($K > 100 \text{ Pa.s}^n$) confirms that panelists have difficulty assessing the level of sliminess in the more consistent samples.

In Figure 19, we can see that Cluster 2 (center) has more panelists (6 panelists) than Cluster 1 (right) and Cluster 3 (left) which are respectively composed of 4 and 3 panelists. The height of the branching for panelists 6 and 12 with the two other panelists of Cluster 1 is quite high. This indicates that these panelists rank one or more samples quite differently from the other panelists of Cluster 1. On Table 11, the panelists have been grouped according to which one of the three clusters they belong to. It can be seen that panelist no. 12 ranks samples 1 and 9 very differently from the three other panelists of cluster 1. Panelist no. 6 ranks samples 3, 4 and 7 quite differently from the other three panelists. These differences in ranking within Cluster 1 certainly explain the greater heterogeneity among the Cluster 1 than among Clusters 2 and 3.

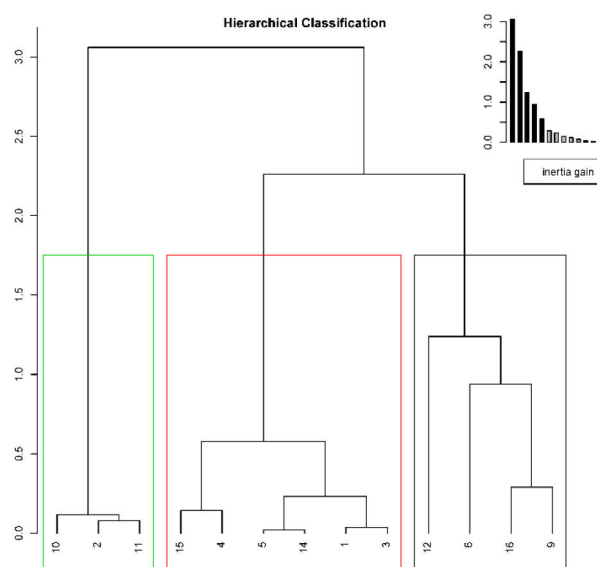


Figure 19 : Hierarchical cluster analysis (HCA) of panelists according to their ranking of the perceived sliminess level of each sample. Only panelists who had a repeatable perception of sliminess were taken into account. Cluster 1 is on the right and framed in black. Cluster 2 is in the middle and framed in red. Cluster 3 is on the left and framed in green.

3.5.2. Rheological and textural preparations' properties affecting the sliminess perception

For each cluster, the average rank assigned to each of the nine samples was calculated and plotted as a function of the measured stringiness and of the consistency index K (Figure 20). The direction of the scatter plots provides information on the effect of stringy and consistent properties on the perception of sliminess by the different clusters of panelists. Thus, with the exception of sample 8, panelists of cluster 1 rank the samples by increasing stringiness (Figure 20A) and decreasing consistency (Figure 20B). Panelists of cluster 2 mainly rank the samples by increasing stringiness (Figure 20C) and barely take into account their consistency (Figure 20D). By contrast, panelists of Cluster 3 rank the samples by increasing consistency (Figure 20F) and to a lesser extent by increasing stringiness (Figure 20E).

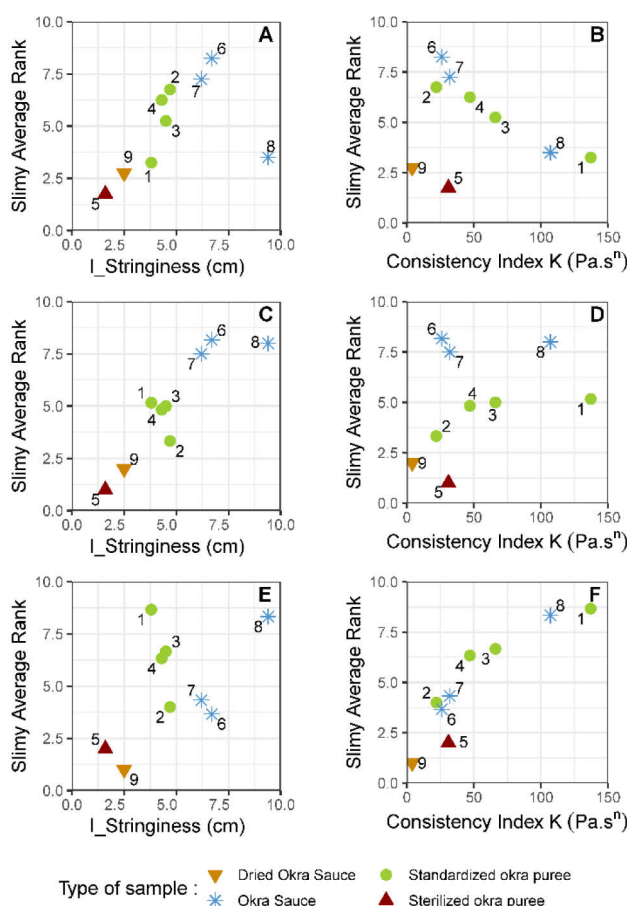


Figure 20 : Average sliminess ranking assigned to the nine samples for each of the 3 clusters (Cluster 1: A & B; Cluster 2: C & D; Cluster 3: E & F) as a function of stringiness and consistency index K. The addition of a prefix before Stringiness enables the sensory attribute measured by hand ($H_Stringiness$) to be distinguished from the instrumental measurement ($I_Stringiness$).

All the graphs in Figure 20 show that the three clusters are unanimous in ranking samples 3 and 4 together in the middle of the ranking and in saying that samples 5 and 9 are the two least slimy samples. But the way in which the panelists take into account the consistency, or not, to rank the samples explains the major differences between the rankings of the three clusters. For instance, in comparison with clusters 2 and 3, if cluster 1 ranks sample 2 higher (i.e. they perceive it as more slimy than the other clusters) and samples 1 and 8 lower (Figure 20B, 20D and 20F), it is because for cluster 1, consistency has a negative effect on the perception of the sliminess level (Figure 20B). Therefore, cluster 1 ranks sample 2 among the three slimiest samples because of its low consistency ($K = 22 \text{ Pa.s}^n$), although it is only moderately stringy. On the other hand, because of their high consistency ($K > 100 \text{ Pa.s}^n$), samples 1 and 8 rank lower in Cluster 1 (Figure 20B). In Figure 20B, 20D and 20F, it can also be observed that cluster 3 ranks samples 6 and 7 much lower than the two other clusters, despite the fact that these two samples are the stringiest. This is due to the fact that for cluster 3, the more consistent samples are perceived to be slimier than the less consistent ones, and that consistency has a greater effect on the ranking than the level of stringiness. Consequently, despite their high level of stringiness ($> 6 \text{ cm}$), samples 6 and 7 belong to the five least slimy samples of cluster 3 because of their low consistency ($K = 23$ and 32 Pa.s^n respectively).

Chapitre 3: Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) preparations and its correlation with instrumental parameters

Tableau 12 : Sliminess definition and/or attributes (translated from French to English) used by the different clusters of panelists to rank the nine samples from least to most slimy. Exponents (1-, 1+ or 2+) indicates to which PCA dimension an attribute or an expression refers to. Attributes referring negatively with the 1st PCA dimension (attribute1- underlined and colored in blue), those referring positively with the 1st PCA dimension (attribute1+ underlined and colored in red) and those referring positively with the 2nd PCA dimension (attribute2+ underlined and colored in green) were counted to calculate a utilization rate for attributes of each dimension, per cluster.

Cluster	Panelist Number	Sliminess definition and/or attributes used by panelists to rank the 9 samples	Numbers of <u>textural attributes negatively correlated to the 1st PCA dimension</u> ¹⁻	Numbers of <u>textural attributes positively correlated to the 1st PCA dimension</u> ¹⁺	Numbers of <u>textural attributes positively correlated to the 2nd PCA dimension</u> ²⁺
Cluster 1	6	"Between fingers, <u>sticky</u> ¹⁺ , <u>stringy</u> ⁺⁺²⁺ , <u>lubricant</u> ²⁺ , <u>elastic</u> ¹⁻ (combination of several <u>viscosity</u> ¹⁺ attributes)."	1	2	2
	9	"A combination of <u>sticky</u> ¹⁺ , <u>stringy</u> ²⁺ , <u>gelatinous</u> ¹⁻ , <u>not too solid</u> ¹⁻ , <u>cohesive</u> ¹⁻ , <u>difficult to divide</u> ¹⁻ and <u>elastic</u> ¹⁻ ."	5	1	1
	12	" <u>Stringy</u> ²⁺ , <u>elastic</u> ¹⁻ , <u>not very compact</u> ¹⁻ ."	2	0	1
	16	"Mix between <u>sticky</u> ¹⁺ and <u>gelatinous</u> ¹⁻ (and <u>lubricant</u> ²⁺ ?)."	1	1	1
	Cluster 1 utilization rate of attributes referring to the 1 st or 2 nd PCA dimension			50%	22%
Cluster 2	1	"A <u>stringy</u> ²⁺ and <u>sticky</u> ¹⁺ texture (touch) + <u>elasticity</u> ¹⁻ of the product (visual)."	1	1	1
	3	" <u>Stringiness</u> ²⁺ , <u>lubricating</u> ²⁺ , <u>stickiness</u> ¹⁺ and <u>thickness/viscosity</u> ¹⁺ . A slimy texture is the result of a flexible (semi-liquid) gel that is <u>lubricating</u> ²⁺ (<u>non-sticky</u> ¹⁻), <u>stringy</u> ²⁺ and whose <u>thickness must not be too thick</u> ¹⁻ (= firm gel) or <u>too thin</u> ¹⁺ (=liquid)."	2	3	4
	4	"Combination of 2 tests: <u>lubricating</u> ²⁺ and <u>stringiness</u> ²⁺ . (Lubricating measurement protocol = take the sample between the 4 fingers (inch-> annular), rub, rinse briefly and rub again. If the movement is facilitated, the sample is lubricating)."	0	0	2
	5	"The visual test of <u>elasticity - resilience</u> ¹⁻ and the <u>stringiness</u> ²⁺ / <u>seizability</u> ¹⁺ helped me to determine the sliminess. I ranked the 9 plates into 3 distinct groups and then ranked each plate into the group."	1	1	1
	14	" <u>Stringy</u> ²⁺ appearance, <u>slipping between the fingers</u> ²⁺ ."	0	0	2
	15	"Glossy, <u>lubricating</u> ²⁺ , <u>stringy</u> ²⁺ ."	0	0	2
	Cluster 2 utilization rate of attributes referring to the 1 st or 2 nd PCA dimension			19%	24%
Cluster 3	2	" <u>Viscous</u> ¹⁺ and <u>sticky</u> ¹⁺ ."	0	2	0
	10	"A texture that <u>sticks</u> ¹⁺ , that is <u>viscous</u> ¹⁺ and <u>elastic</u> ¹⁻ ."	1	2	0
	11	"Dominant <u>seizable</u> ¹⁺ , combined with <u>stringy</u> ²⁺ and <u>finger adhesiveness</u> ¹⁺ (what remains on the fingers)."	0	2	1
	Cluster 3 utilization rate of attributes referring to the 1 st or 2 nd PCA dimension			13%	75%
Panelists with a non-repeatable sliminess perception	7	" <u>Lubricating</u> ²⁺ , <u>sticky</u> ¹⁺ , <u>not too liquid</u> ¹⁻ ."	1	1	1
	8	" <u>The feeling of a film of puree on your fingertips when rubbing it on your fingers</u> ²⁺ ."	0	0	1
	13	"A combination of <u>stringy</u> ²⁺ , <u>seizable</u> ¹⁺ and <u>adhesive</u> ¹⁺ ."	0	2	1

Sliminess definitions and attributes that were used by the panelists of the three clusters to rank samples from least to most slimy are presented in Table 12. For each definition, the number of used terms referring to the 1st and 2nd dimensions of PCA was counted by distinguishing, for each dimension, positively correlated terms from negatively correlated terms. Among the 16 definitions, none of the terms referred to a negative correlation with the 2nd PCA dimension. Whereas all the panelists of cluster 1 and cluster 2 said they used at least 1 attribute of the second dimension (for example: « *stringy* », « *lubricating* », « *slipping between the fingers* »), only 1/3 panelists in cluster 3 said they took into account stringiness when ranking the samples (Panelist No. 11, Table 12). Among the 18 attributes found in the four definitions of cluster 1, the majority of terms (50%) referred to attributes negatively correlated to the 1st PCA dimension (« *elastic* », « *cohesive* », « *difficult to divide* », « *not too solid* », « *not very compact* », « *gelatinous* ») against only 22% that were positively correlated (« *sticky* », « *viscosity* »). This confirms that while taking into account the stringy dimension of the preparations, cluster 1 panelists have mainly ranked samples by taking into account attributes negatively correlated with the consistency dimension. Among the 21 attributes used by cluster 2 panelists, while the vast majority of terms referred to the 2nd PCA dimension (57% of textural attributes used), an equivalent proportion of attributes (24 and 19% respectively) were correlated to the 1st dimension positively (« *sticky* », « *thickness/viscosity* », « *too thin* », « *seizability* ») and negatively (« *elasticity* », « *non-sticky* », « *thickness must not be too thick* », « *elasticity - resilience* »). This shows that for the panelists of cluster 2, the role of the stringy dimension attributes in the sliminess ranking is clear and preponderant while the role of the consistency dimension attributes is minor and more ambiguous. Finally, out of the seven attributes found in the three definitions of the panelists of cluster 3, 75% are positively correlated to the 1st PCA dimension (« *viscous* », « *sticky* », « *seizable* », « *finger adhesiveness* »). This shows that for the panelists of cluster 3, the ranking was mainly done by observing attributes of the 1st PCA dimension.

The analysis of « sliminess » definitions and attributes used by panelists of the 3 clusters to rank the samples from least to most slimy confirms and completes the interpretation made of Figure 20. To rank the samples, panelists of the different clusters did not take into account attributes of the consistency and stringy dimensions in the same way, and with the same importance. In most cases, for all panelists, the slimiest samples are the stringiest. But while for some panelists the consistency of the preparations is of little importance (cluster 2), for those who do place importance on the consistency, they rank samples differently depending on whether they consider the slimiest samples to be the most consistent (cluster 3) or the least consistent (cluster 1).

4. General Discussion

4.1. Characterization and prediction of the textural perception of slimy preparations with the measurement of stringiness and consistency index K

Nine slimy preparations, that were very different from each other, were prepared with okra by varying their formulation and process. A quantitative sensory analysis was carried out to describe the texture of these preparations with 11 attributes. The results of this study confirm and complement those of Savouré et al. (2020) who showed that it is necessary and sufficient to investigate both the viscous and elongational properties of slimy suspensions to characterize the effects of the process and/or formulation on their textural properties. Indeed, they show that the effects measured with instrumental methods correspond extremely well to the effects evaluated sensorially, and vice-versa. Therefore, the use of instrumental

measurements to characterize the impact of the process and/or formulation on the texture of slimy preparations reflects the sensory perception well. To do so, the consistency index K and stringiness appears to be particularly adapted.

In agreement with the results of He et al. (2016) and Richardson et al. (1989), the results of this study show that the measurement of the consistency index K of slimy preparations enables the sensory perception of their consistency, as well as the functional properties related to it (« divisibility », « seizability » and « chewiness – work in mouth ») to be predicted. However, the use of the consistency index K was not suitable for predicting the « adhesiveness » and « elasticity – resilience » of the preparations. In the future, « adhesiveness » could perhaps be predicted using the protocol proposed by Chen et al. (2008).

Like Gilbert et al. (2013), our results show that the sensory perception of stringiness can be accurately predicted by the test that instrumentally mimics its evaluation. By contrast, the « stringiness » measurement seemed inadequate to predict the sensory perception of « lubricating ». In future studies, tribological measurements, or other instrumental protocols being developed to measure the lubricating properties of soft foods (Nishinari et al., 2019), could be used to predict the perception of « lubricating » in slimy preparations.

4.2. Bi-dimensional and subjective perception of sliminess

Although the perception of sliminess is well correlated with instrumental measurement of stringiness, the results of this study show that the measurement of the latter is not sufficient to predict the level of sliminess of all samples by all individuals. Indeed, our results suggest that the perception of sliminess is affected by their consistency. This is in line with the findings of Roulon-Doko (1996) which suggest that, for African consumers, in addition to its elongational properties, the consistency of a slimy sauce has to be neither "too liquid" nor "too compact". In addition to being bi-dimensional, because it can be defined and perceived differently by different individuals, the notion of sliminess is complex.

The definitions used in the few studies that have investigated how to instrumentally measure sliminess (Table 5) can be analyzed in the same way as definitions used by our panelists (Table 12). Indeed, while some definitions favored attributes of the consistency dimension (Szczesniak & Farkas, 1962; Uzo & Ojiako, 1980), others took into account both the consistency and stringiness dimension attributes (Terpstra, 2008; Weenen et al., 2003) or only the stringiness dimension (Azi et al., 2017). These differences are very close to the differences observed between the definitions of clusters 1, 2 and 3 and confirm the difficulty of clearly defining the notion of a « slimy » texture.

Since the definition of sliminess was very different from one study to another, it is not surprising that their results did not show a clear and consistent trend in how to measure instrumentally the sensory perception of the « slimy » texture. For example, in the studies for which the notion of sliminess was defined with only attributes of the consistency dimension, a correlation was found between the perception of sliminess in the mouth and the flow properties of the studied food (with shear thinning properties for Szczesniak & Farkas (1962); with viscous properties for Uzo & Ojiako (1980)). A correlation with flow properties has also been identified by Richardson et al. (1989) and Wood (1974), whereas in these studies, panelists were free to adopt their own definition/protocol for determining sliminess. Unlike these four studies, Terpstra et al. (2009) did not identify rheological measurements that correlate well with the perception of slimy afterfeel. Inclusion of consistent and stringy dimensions in its definition may explain this lack of correlation. Another reason may be that none of the instrumental methods used in this study could measure elongational properties. When compared to all these previous studies, our results highlight the importance of elongational properties in the perception of

sliminess. They show that it is the combined perception of consistency and stringiness that can explain the perception of sliminess. In doing so, they complement and validate the instrumental work carried out by Leakey et al. (2005), Saviouré et al. (2020) and Yuan et al. (2018) on different slimy ingredients, but using a sensory approach.

In former studies, viscous properties of okra were measured to study the effect of freezing (Falade & Omojola, 2010; Olorunda & Tung, 1977), drying (Falade & Omojola, 2010; Inyang & Ike, 1998), blanching (Aworh et al., 1980; Inyang & Ike, 1998), cooking time (Woolfe et al., 1977), and formulation (Owoeye et al., 1990) on the textural properties of okra or other slimy ingredients (Assi et al., 2017; Azi et al., 2017). Our results show that only measuring the viscous properties of okra is not enough to analyze the impact of process and/or formulation on the slimy properties of these ingredients. For this analysis, it is necessary to combine the study of viscous and elongational properties.

5. Conclusion

The texture of okra-based slimy preparations can be described using attributes referring to their mechanical properties of texture (« compactness », « firmness », « thickness », « elasticity - resilience », « stringiness », « adhesiveness ») from which attributes referring to their functional properties that are important to African consumers (« seizability », « divisibility », « chewiness - work in mouth », « lubricating ») may depend. The perception of their slimy texture results from the combined perception of their viscous and elongational properties. This means that, for a given consistency, the sliminess of a preparation will be perceived differently depending on its elongational properties. Furthermore, for a given level of stringiness, varying the consistency of a preparation will affect the perception of its sliminess. Therefore, sliminess can be defined as a complex textural property resulting from the subjective and combined perception of elongational and viscous properties of semi-solid matrices. It would therefore be interesting to study to what extent the perception of sliminess varies according to the cultural context. In the context of African slimy sauces, research on consumer sensory preferences is needed to determine what level of consistency and stringiness is expected by African consumers to assess the texture of a slimy sauce as optimal.

Our results show that it is not possible to reliably predict the perception of sliminess with a single instrumental measurement. Instead, the combined measurement of the consistency index K with its stringiness is necessary and sufficient to characterize the texture of a slimy preparation. These two instrumental measurements can predict the sensory perception of consistency and stringiness. They therefore make it possible to monitor the effect of process and formulation on the textural properties of slimy ingredients like *Abelmoschus esculentus*, *Irvingia gabonensis*, *Triumfetta cordifolia*, *Adansonia digitata* or *Corchorus olitorius*. For these plant species, these two measurements could also be used in varietal selection programs.

One of the main contributions of this work lies in the importance of the « stringiness » attribute in the perception of the texture of slimy preparations. Stringiness can be defined as a mechanical property of texture related to the ductility of a semi-solid matrix, i.e. its ability to resist plastic deformation without breaking. It is evaluated by applying a sudden elongation force to a product placed between the fingers. The main adjectives for different levels of stringy preparation are « brittle » (low level, e.g. tomato sauce) and « stretchy » (high level, e.g. egg white, processed cheese or okra sauce). In the future, the « stringiness » attribute could be used for the sensory analysis of other slimy ingredients or semi-solid foods.

Acknowledgments

We would like to express our thanks to Mr. Nono (AS Food International) for his support as well as Nelly Forestier from Cirad and the 16 panelists for their contribution to the quantitative descriptive analysis.

Ethical statements

Conflict of Interest: The authors declare that they do not have any conflict of interest.

Ethical Review: This study does not involve any animal testing.

Informed Consent: Written informed consent was obtained from all study participants.

Data availability statement

The data that support the finding of this study are available from the corresponding author (A.C.), upon reasonable request.

Author contributions

Conceptualization, Methodology, Visualization and Writing – Reviewing and Editing, T.S., M.D., A.C., I.M.; Resources, T.S, I.M.; Investigation, Data Curation, Software, Visualization, Formal Analysis, Writing – Original Draft, T.S.; Supervision and Validation, A.C., M.D., I.M.; Funding Acquisition and Project Administration, A.C.

L'objectif du travail réalisé était d'évaluer si les mesures instrumentales identifiées dans le chapitre 2 étaient adaptées pour prédire la perception sensorielle de la texture gluante (action 2, figure 4). Pour cela, neuf sauces gombo ont été préparées en faisant varier leur formulation et le procédé de préparation. Une analyse sensorielle descriptive quantitative et un test de classement ont été réalisés avec un panel entraîné de 16 panelistes.

Les résultats ont montré que la texture des sauces gluantes préparées à base de gombo peut être décrite à l'aide de descripteurs faisant référence à leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles. La très bonne qualité ($R^2 > 0.85$) des régressions logarithmiques et semi-logarithmique des attributs sensoriels de la consistance en fonction de l'indice de consistance K a montré que cette mesure instrumentale permettait de prédire la perception sensorielle de ces attributs. La très bonne qualité ($R^2 = 0.887$) de la régression semi-logarithmique de la perception du gluant en fonction de la mesure instrumentale du filant montre que les propriétés élongationnelles des purées de gombo contribuent fortement à la perception sensorielle de la texture gluante. Enfin, un test de classement a montré que la perception de la texture gluante résulte de la perception combinée de la consistance et des propriétés élongationnelles des sauces gombo. Pour mesurer et prédire la perception sensorielle des sauces gluantes, il faut donc combiner la mesure instrumentale de l'indice de consistance K avec celle du filant.

Ces deux indicateurs sont donc adaptés pour suivre la dégradation de la qualité texturale du gombo pendant le traitement thermique. L'objectif est à présent d'identifier les modèles cinétiques permettant de décrire, modéliser et prédire l'évolution de la texture du gombo au cours du traitement thermique (action 3, chapitre 4).

Chapitre 4

Chapitre 4: Cinétiques de dégradation de la texture de purées de gombo au cours de la stabilisation thermique (70-130 °C)

1. Introduction

Le gombo (*Abelmoschus esculentus*) est un légume vert très apprécié en Afrique de l'Ouest et Centrale en raison de la texture gluante qu'il confère aux sauces, soupes et ragouts (Kouebou et al., 2013). Cette propriété texturale est le principal critère de qualité que recherchent les consommateurs africains lorsqu'ils consomment des sauces gombo (Inyang et Ike, 1998; Uzo et Ojiako, 1980).

Comme le gombo frais se dégrade rapidement à température ambiante, un procédé de stabilisation doit être appliqué pour qu'il se conserve dans le temps. Concernant l'impact du procédé sur les propriétés texturales du gombo, les études antérieures se sont focalisées sur la viscosité (dynamique, cinématique ou relative) du mucilage ou des sauces gombo. Elles montrent que les propriétés visqueuses du gombo sont dégradées par la congélation (Falade & Omojola, 2010; Olorunda & Tung, 1977), le séchage (Falade & Omojola, 2010; Inyang & Ike, 1998), le blanchiment (Aworh et al., 1980; Inyang & Ike, 1998) et la cuisson (Woolfe et al., 1977). Ces effets des procédés de conservation sur les propriétés rhéologiques et texturales du gombo constituent un frein majeur à la consommation de ce légume sous forme stabilisée en Afrique (Aworh et al., 1980; Olorunda & Tung, 1977). La stabilisation thermique est une voie de conservation possible. La question est de savoir comment préserver au mieux la qualité texturale du gombo pendant ce procédé de conservation.

La qualité texturale de la purée de gombo dépend fortement des conditions dans lesquelles est effectuée la stabilisation thermique. Par conséquent, il est nécessaire d'évaluer comment évolue sa qualité texturale au cours de cette opération unitaire.

Parmi les mesures instrumentales permettant de mesurer les propriétés rhéologiques et texturales du gombo, l'indice de consistance K et le filant sont deux mesures (i) suffisantes pour caractériser les propriétés rhéologiques et texturales des purées de gombo (ii) nécessaires pour les discriminer en fonction du procédé et de la formulation avec lesquelles elles ont été préparées (Savouré et al., 2020) et (iii) adaptées pour mesurer et prédire la perception sensorielle de la texture de ces purées (Savouré et al., 2021).

L'objectif de cette étude est d'identifier les paramètres cinétiques permettant de décrire, modéliser et prédire l'évolution de l'indice de consistance K et du filant d'une purée de gombo au cours du traitement thermique.

2. Matériel et méthode

2.1. Génération des échantillons

Un lot de purée de gombo a été produit. A partir de celui-ci, des échantillons ont été préparés en ajustant leur pH puis en les traitant thermiquement à différentes températures.

2.1.1. Plan d'expériences

Afin d'obtenir les cinétiques de dégradation des purées de gombo en fonction de la température et du pH, un plan d'expériences en réseau de Doehlert (Doehlert, 1970) à 2 facteurs a été mis en place (Figure 21). La gamme de températures explorée englobe les valeurs habituellement utilisées en pasteurisation et stérilisation (70-130 °C). Le pH est modulé entre 5 (pH obtenu après acidification), 6 (pH naturel du légume) et 7 (pH obtenu après alcalinisation traditionnelle dans la cuisine africaine). Le point central (pH 6 ; 100 °C) a été répété 3 fois. Trois points supplémentaires ont été ajoutés afin que le nombre de points par pH (3 à 4) soit suffisant pour évaluer les énergies d'activation avec un modèle d'Arrhenius.

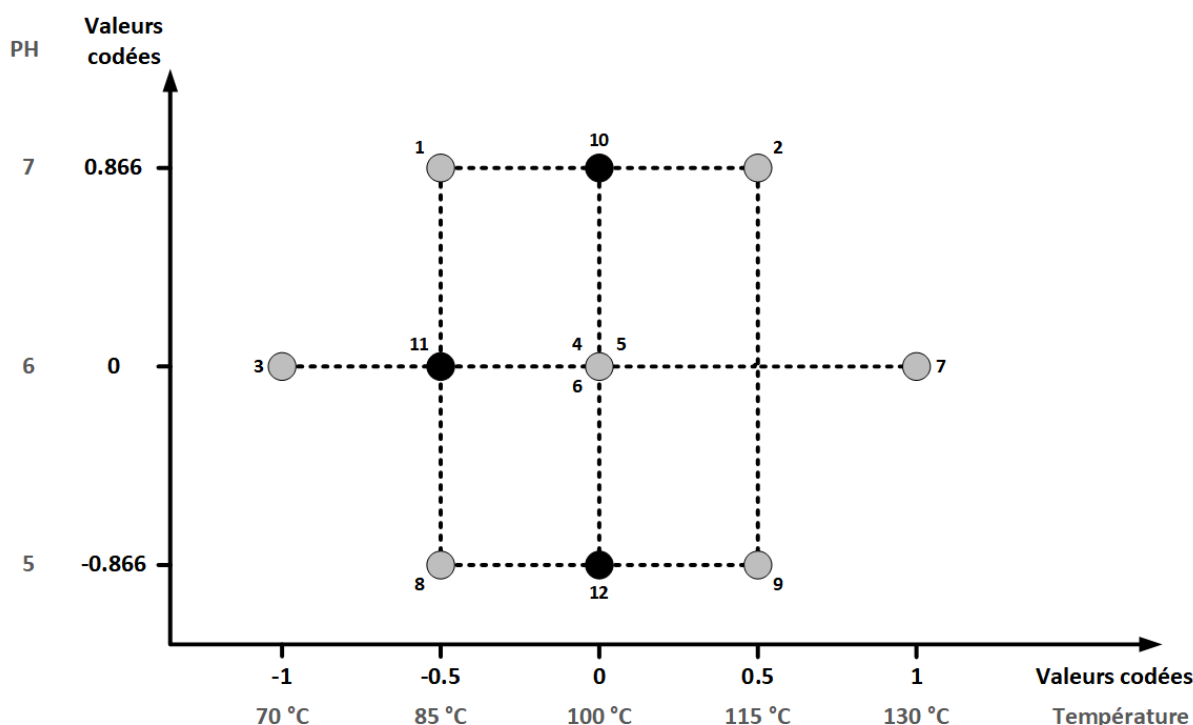


Figure 21 : Conditions expérimentales du plan d'expériences en réseau de Doehlert (points 1 à 9) en valeurs codées et en valeurs réelles. Les points expérimentaux supplémentaires (points 10 à 12) sont représentés en noir.

Pour chaque point du plan d'expériences, afin d'obtenir la cinétique de dégradation des purées de gombo, les échantillons ont été prélevés à 5 temps de chauffage (t_0 , t_1 , t_2 , t_3 et t_4) choisis en fonction des températures de traitement (Tableau 13).

Tableau 13 : Temps de prélèvement des échantillons et températures du bain de préchauffage appliquées en fonction de la température de traitement cible.

Température (°C)	de traitement cible	70	85	100	115	130
	du bain de préchauffage		110	125	150	155
Durée de maintien dans le bain (min)	t_0	0	0	0	0	0
	t_1	60	30	10	20	10
	t_2	120	60	20	40	20
	t_3	210	110	45	70	30
	t_4	300	200	120	100	40

2.1.2. Préparation des échantillons de purée de gombo

Un lot de 5 kg de gombos frais a été acheté localement (Grand Frais et Paris Store, Montpellier, France). Après élimination manuelle des graines et pédoncules, les gombos ont été blanchis à la vapeur à 90 °C pendant 2 min. Puis, ils ont été broyés dans de l'eau (ratio massique eau/gombo = 1/4) sous une pression réduite de 200 mbar (Stephan UMC5, Hameln, Germany, 2007). Après homogénéisation manuelle, la purée obtenue a ensuite été conditionnée dans des sachets en polyéthylène (160 g de purée/sachet). Enfin, les échantillons obtenus ont été mis sous vide à 120 mbar (Multivac C200, Wolfertschwenden, Germany, 2009), puis congelés et stockés à -18°C.

Avant utilisation, ces échantillons étaient décongelés dans un bain marie 1 h à 30 °C. Leur pH était ajusté conformément au plan d'expériences (Figure 21) par ajout d'une solution d'acide citrique à 0,3 g·mL⁻¹ ou d'une solution de carbonate de sodium à 0,2 g·mL⁻¹ puis de l'eau distillée était ajoutée pour ajuster leur teneur en eau (13 % bs).

2.1.3. Traitement thermique des échantillons

Afin de se rapprocher au mieux de traitements isothermes homogènes, les traitements thermiques ont été réalisés dans 3 cellules d'essai hermétiques, fabriquées en acier inoxydable et de conception similaire à celles mises au point par Jiménez *et al.* (2010, 2020). Les cellules utilisées présentaient un diamètre intérieur de 90 mm, une hauteur intérieure de 7 mm et une capacité d'environ 44 ml. Un joint garantissait la fermeture hermétique de la cellule d'essai. Afin d'augmenter l'échange thermique et l'homogénéité de la température à l'intérieur, des ailerons radiaux de 1 mm d'épaisseur divisaient chaque cellule en 10 compartiments. Un thermocouple de type J (modèle 405-163, TC Direct, Dardilly, France) était situé au centre géométrique d'un des compartiments et était relié à un enregistreur de données (ALMEMO 2690-8A, Ahlborn, Holzkirchen, Allemagne). Grâce à ce dispositif, l'évolution de la température du produit pendant le traitement thermique était enregistrée toutes les 20 secondes. Le thermocouple de chaque cellule de test a été calibré dans un bain d'huile par rapport à un thermomètre calibré et toutes les mesures de température ont été corrigées.

Chaque échantillon de purée de gombo était introduit dans le dispositif à température ambiante (25 ± 2 °C). Puis, le dispositif était immergé dans deux bains d'huiles équipés de thermostats. Tout d'abord, le dispositif était plongé dans un bain de préchauffage dont la température dépendait de la température cible (Tableau 13). Lorsque la température à cœur était inférieure de 15 °C à la température cible, le dispositif était plongé dans un second bain d'huile, porté à la température de traitement. Le changement de bain d'huile durait moins de 5 s. La température de chaque bain était contrôlée grâce à une sonde PT 100 (référence FPA22L0100, Wimesure, Chevreuse, France) relié au même enregistreur que les thermocouples. Lorsque le temps de maintien était écoulé (Tableau 13), le dispositif était immergé dans un bain d'eau glacée (0 °C) jusqu'à ce que la température à cœur atteigne 25 °C. L'échantillon était ensuite retiré de la cellule et stocké à 4 °C pendant une nuit jusqu'à analyse.

2.2. Méthodes de mesure instrumentales

Avant d'effectuer les mesures rhéologiques et texturales, chaque échantillon était plongé dans un bain marie pour être remis à température ambiante (25°C ±1 °C). Puis, de l'eau distillée était ajoutée pour ajuster leur teneur en eau (17 % bs). En effet, de précédents résultats ont montré que la teneur en eau avait un effet positif sur les propriétés filantes des purées de gombo (Savouré et al., 2020). Des expériences préliminaires à cette étude ont

montré que le filant des purées de gombo préparées était maximale lorsque leur teneur en eau était de 17 % (bs).

2.2.1. Mesure de l'indice de consistance K

Un rhéomètre Anton Paar MCR 301 équipé d'une cellule d'amidon (C-ETD160/ST) et d'une géométrie composée de 3 paires d'ailes (ST24-2D/2V/2V-30) a été utilisé pour réaliser une mesure d'écoulement en régime permanent (taux de cisaillement variant de 10^{-3} à 10^3 s^{-1} ; 5 mesures / décade de taux de cisaillement; température = 25 °C). Chaque mesure était répétée 2 à 3 fois par échantillon. L'indice de consistance K était ensuite calculé en utilisant l'équation d'Ostwald-de Waele (eq. 1).

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (eq. 1)$$

Avec :

- τ = contrainte de cisaillement (Pa)
- $\dot{\gamma}$ = taux de cisaillement (s^{-1})
- K = indice de consistance (Pa.sⁿ)
- n = indice d'écoulement

2.2.2. Mesure du filant

Afin de mesurer le filant, une procédure en 3 étapes a été utilisée (un dessin du dispositif expérimental utilisé est présenté dans Savouré *et al.* (2020) :

1. Enregistrement d'un test d'étirement avec une caméra : Après avoir été placé dans un cylindre en acier (diamètre = 3 cm ; profondeur = 5,2 cm), chaque échantillon était laissé à relaxer pendant 2 min. Ensuite, un analyseur de texture Stable Micro Systems TA.XT plus équipé d'une sonde cylindrique en PVC (diamètre = 2 cm) était utilisé pour effectuer un test d'étirement (vitesse de descente de la sonde = 10 $mm \cdot s^{-1}$; pénétration de 2 mm de la sonde dans l'échantillon après détection d'une force de déclenchement de 19,6 mN ; vitesse de remontée de la sonde = 40 $mm \cdot s^{-1}$). La pénétration de 2 mm de la sonde dans l'échantillon, avant l'étirement, est destinée à assurer une bonne adhésion entre la sonde et la suspension.
2. Extraction de l'image correspondant à la longueur maximale d'élongation du filament, atteinte lors de la remontée de la sonde. Le logiciel VLC Media Player était utilisé pour capturer et extraire l'image du film d'essai d'étirement.
3. Mesure de la longueur du filament avant rupture avec le logiciel ImageJ2 (Rueden *et al.*, 2017; Schindelin *et al.*, 2012).

Chaque mesure était répétée 15 fois.

2.2.3. Mesures physico-chimiques

Le pH était mesuré à l'aide d'un pH-mètre TitroLine® 5000 (SI Analytics, Weilheim, Germany, 2017).

2.3. Analyse des résultats

2.3.1. Développement du modèle cinétique de dégradation de la texture

Dans un premier temps, pour chacun des 12 points expérimentaux, un modèle cinétique d'ordre 1 a été retenu pour représenter l'évolution de l'indice de consistance K et du filant ($Y(t)$) en fonction du temps (min) soit :

$$Y(t) = Y_0 \times e^{-k \cdot t} \quad (\text{eq. 6})$$

Avec Y_0 la valeur du paramètre (filant ou de l'indice de consistance K) à $t = 0$, et k la constante de vitesse (en min^{-1}).

Dans un second temps, pour représenter l'évolution de la constante de vitesse k (en min^{-1}) en fonction de la température du système (T en K), l'équation d'Arrhenius (eq. 8) a été utilisée. Cela a permis d'identifier la constante de vitesse à la température de référence (k_{ref} en min^{-1}) et l'énergie d'activation apparente (E_a en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$) à la température de référence ($T_{ref} = 100$ °C). Pour cela, l'hypothèse a été faite que la température au sein du produit (T) était constante et homogène et correspondait donc à la température de consigne.

$$k = k_{ref} \times e^{\frac{-E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (\text{eq. 7})$$

Avec R la constante universelle des gaz parfaits ($R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

2.4. Analyse du plan d'expériences

Pour les 9 points du plan d'expériences (points 1 à 9), les effets de la température de traitement thermique et du pH sur les constantes de vitesse de dégradation du filant et de l'indice de consistance K ont été estimés. Pour cela, des corrélations ont été établies avec un modèle polynomial du second ordre (eq. 2) :

$$Y = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_i a_{ii} X_i^2 + \sum_{ij} a_{ij} X_i X_j \quad (\text{eq. 2})$$

Où y est la réponse (constantes de vitesse du filant et de l'indice de consistance K), X_i est le facteur i (température du traitement, pH), a_0 est la constante du modèle, a_i est l'effet linéaire de X_i , a_{ii} est l'effet quadratique de X_i , et a_{ij} l'effet de l'interaction entre X_i et X_j .

2.4.1. Logiciel utilisé

Le logiciel R-3.5.1 (R Core Team, 2018) a été utilisé pour analyser les données. Le package `nls.multstart` (Padfield & Matheson, 2018) a permis d'estimer les paramètres des modèles cinétiques avec une régression non linéaire. L'analyse du plan d'expériences a été réalisée grâce au package `rsm` (Lenth, 2009).

3. Résultats

3.1. Paramètres cinétiques estimés pour tous les points expérimentaux

Les paramètres cinétiques estimés pour les 12 points expérimentaux sont présentés dans le Tableau 14. La qualité des modèles cinétiques est bonne ($R^2_{adj} > 0,8$) pour tous les points expérimentaux dont la température de traitement était supérieure ou égale à 100 °C (à l'exception des points 6 et 10 pour l'indice de consistance pour lequel $R^2_{adj} < 0,6$). Pour certains

pH, la mauvaise qualité des modèles correspondant à 70 et 85°C est probablement dû au fait qu'à ces pH et à ces température (voir les données expérimentales représentées sur les Figures 22A, D, et E et les Figures 23D et H), la dégradation de la texture est très faible ($k \leq 0,5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ pour le filant ; $k \leq 1 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ pour l'indice de consistance K).

Pour chaque pH, l'augmentation de la température de traitement s'accompagne d'une augmentation de la constante de vitesse. Cela suggère un comportement arrhénien (vérifié par ailleurs en représentant $\ln(k)$ en fonction de $1/T$).

La comparaison des constantes de vitesse estimées pour le filant et l'indice de consistance K révèle que les constantes de vitesse du filant sont presque toutes supérieures à celles de l'indice de consistance K. Cela révèle que le filant est plus sensible à la température que l'indice de consistance K.

Tableau 14 : Valeurs initiales (Y_0) et constantes de vitesse (k) de la dégradation thermique du filant et de l'indice de consistance K identifiées pour les 9 points du plan d'expériences (en italique) et pour les 3 points supplémentaires (en gras).

Sample Number	Treatment temperature (°C)	pH	Estimated kinetic parameters (Y_0 and k) for:					
			Stringiness (cm)			Consistency index K (Pa·s ⁿ)		
			Y_0	k ($\times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$)	R^2_{adj}	Y_0	k ($\times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$)	R^2_{adj}
8	85	5	<i>8,1 ± (0,2)</i>	<i>2,1 ± (0,2)</i>	<i>0,58</i>	<i>165 ± (5)</i>	<i>0,3 ± (0,3)</i>	<i>-0,13</i>
12	100	5	7,5 ± (0,1)	11,8 ± (0,7)	0,88	169 ± (3)	3,4 ± (0,6)	0,81
9	115	5	<i>7,3 ± (0,2)</i>	<i>34,1 ± (2)</i>	<i>0,89</i>	<i>158 ± (8)</i>	<i>10,5 ± (1,4)</i>	<i>0,89</i>
3	70	6	<i>7,2 ± (0,3)</i>	<i>0 ± (0,2)</i>	<i>-0,04</i>	<i>161 ± (4)</i>	<i>0 ± (0,1)</i>	<i>-0,31</i>
11	85	6	7,1 ± (0,2)	0,5 ± (0,2)	0,03	166 ± (3)	1,2 ± (0,2)	0,81
4	100	6	<i>8,6 ± (0,1)</i>	<i>9,8 ± (0,6)</i>	<i>0,88</i>	<i>164 ± (5)</i>	<i>4,5 ± (0,7)</i>	<i>0,89</i>
5	100	6	<i>8,5 ± (0,1)</i>	<i>9,6 ± (0,5)</i>	<i>0,89</i>	<i>155 ± (2)</i>	<i>3,7 ± (0,3)</i>	<i>0,96</i>
6	100	6	<i>8,2 ± (0,1)</i>	<i>8,5 ± (0,4)</i>	<i>0,92</i>	<i>148 ± (4)</i>	<i>1,5 ± (0,6)</i>	<i>0,46</i>
7	130	6	<i>7,6 ± (0,2)</i>	<i>61,6 ± (3)</i>	<i>0,92</i>	<i>171 ± (10)</i>	<i>29,7 ± (5)</i>	<i>0,86</i>
1	85	7	<i>7,6 ± (0,2)</i>	<i>0,1 ± (0,2)</i>	<i>-0,02</i>	<i>157 ± (3)</i>	<i>0,8 ± (0,2)</i>	<i>0,5</i>
10	100	7	8,1 ± (0,1)	6,6 ± (0,5)	0,82	157 ± (5)	3,4 ± (0,8)	0,59
2	115	7	<i>7 ± (0,2)</i>	<i>21,6 ± (1)</i>	<i>0,91</i>	<i>144 ± (6)</i>	<i>6,3 ± (1)</i>	<i>0,81</i>

3.2. Résultats du plan d'expériences

Tableau 15 : Effets de la température du traitement et du pH sur les constantes de vitesse de dégradation du filant et de l'indice de consistance K des purées de gombo du plan d'expériences (points 1 à 12 du plan d'expériences)

Coefficient ¹	$k_{\text{Stringiness}} (\times 10^{-3} \text{ min}^{-1})$	$k_{\text{Consistency index K}} (\times 10^{-3} \text{ min}^{-1})$
Constant		
a_0	9,4**	3,5
Linear		
a_1	27,8***	8,3**
a_2	-6,5*	-1,1
Interactions		
a_{12}	-4,1	-1,7
Quadratic		

a_{11}	9,7**	3,2
a_{22}	-0,7	-4,1
R^2	0,997	0,941
¹ Indices 1, and 2 refer to treatment temperature and pH respectively.		
Significance (p-value) : *** <0,01% / ** <1% / * <5%		

Le Tableau 15 présente les effets de la température de traitement et du pH des purées de gombo sur les constantes de vitesse de dégradation des deux indicateurs de texture. La vitesse de dégradation du filant est significativement affectée par la température de traitement ($a_1 = 27,8$ et $a_{11} = 9,7$) et par le pH ($a_2 = -6,5$). La comparaison de ces coefficients indique que l'effet de la température de traitement est plus fort que celui du pH. Le fort effet linéaire de la température de traitement thermique indique que l'augmentation de la température de traitement augmente la vitesse de dégradation du filant. L'effet linéaire négatif du pH indique que l'augmentation du pH a pour effet de diminuer la vitesse de dégradation du filant.

Concernant la vitesse de dégradation de l'indice de consistance, le seul effet significatif est l'effet linéaire de la température de traitement ($a_2 = 8,3$). Comme pour le filant, l'augmentation de la température de traitement thermique accentue la vitesse de dégradation de l'indice de consistance K des purées de gombo. Par contre, le pH n'a pas d'effet significatif sur la vitesse de dégradation de l'indice de consistance K.

3.3. Modélisation arrhénienne de la dégradation de la texture du gombo par pH

Les paramètres cinétiques estimés pour chaque pH à partir des valeurs mesurées pour les 12 points expérimentaux sont présentés dans le Tableau 16. L'observation des R^2_{adj} montre que les modèles sont de bonne qualité ($R^2_{adj} > 0,8$ pour tous les modèles à l'exception du modèle de dégradation de l'indice de consistance à pH 7 pour lequel $R^2_{adj} = 0,78$). La comparaison des valeurs texturales prédites par les modèles de chaque pH avec les valeurs observées (Figure 22 et 23) montre que les 6 modèles permettent de représenter fidèlement la dégradation de la texture des purées de gombo au cours du traitement thermique.

Tableau 16 : Valeurs moyennes \pm intervalle de confiance à 95 % estimés à chaque pH pour les valeurs initiales (Y_0) et les paramètres cinétiques (k_{ref} et E_a) de la dégradation thermique du filant et de l'indice de consistance K ($T_{ref} = 100$ °C).

Texture parameter	pH	Y_0	$k_{ref} (\times 10^{-3} \text{ min}^{-1})$	$E_a (\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	R^2_{adj}	Corresponding charts
Stringiness (cm)	7	$8 \pm 0,2$	$4,98 \pm 0,64$	128 ± 10	0,88	Figures 22A, B et C
	6	$7,8 \pm 0,2$	$7,19 \pm 0,61$	98 ± 5	0,81	Figures 22D, E, F et G
	5	$7,9 \pm 0,2$	$9,98 \pm 0,91$	112 ± 7	0,9	Figures 22H, I et J
Consistency index K (Pa.s ⁿ)	7	163 ± 6	$2,72 \pm 0,85$	82 ± 24	0,78	Figures 23A, B et C
	6	161 ± 5	$3,32 \pm 0,74$	93 ± 10	0,87	Figures 23D, E, F et G
	5	166 ± 6	$2,38 \pm 1,07$	132 ± 37	0,9	Figures 23H, I et J

Chapitre 4: Cinétiques de dégradation de la texture de purées de gombo au cours de la stabilisation thermique (70-130 °C)

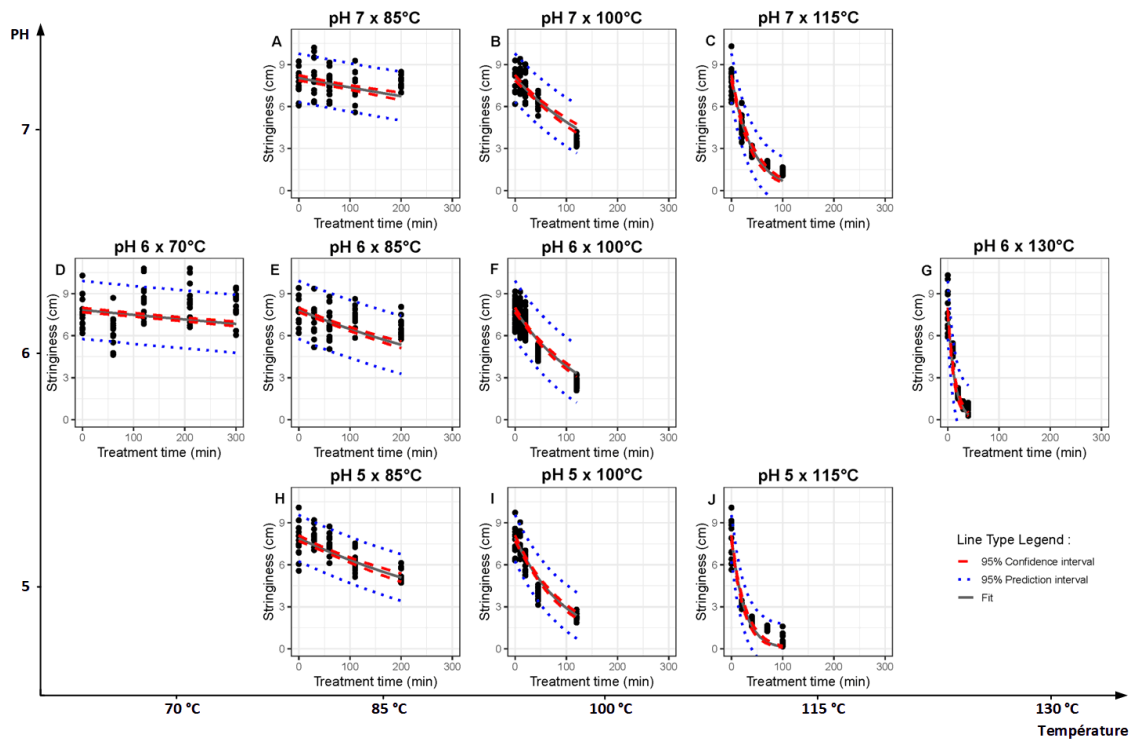


Figure 22 : Représentation graphique des valeurs de filant mesurées à différents temps de traitement pour les 12 points du plan d'expériences. Les valeurs prédites par le modèle cinétique identifié par pH (Tableau 16) sont représentées par une ligne grise. Les tirets rouges représentent l'intervalle de confiance du modèle et les pointillés bleus représentent l'intervalle de prédiction.

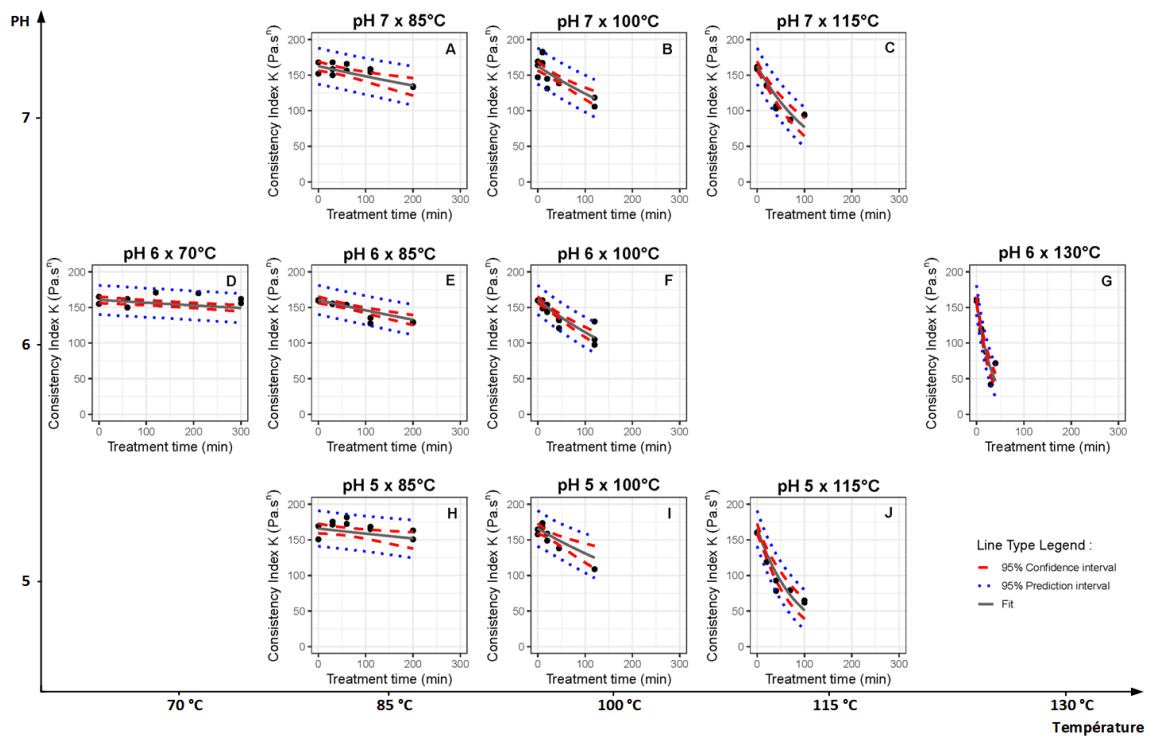


Figure 23 : Représentation graphique des valeurs d'indice de consistance K mesurées à différents temps de traitement pour les 12 points du plan d'expériences. Les valeurs prédites par le modèle cinétique identifié par pH (Tableau 16) sont représentées par une ligne grise. Les tirets rouges représentent l'intervalle de confiance du modèle et les pointillés bleus représentent l'intervalle de prédiction.

En cohérence avec les résultats du plan d'expériences, l'observation des k_{ref} estimés pour les différents pH (Tableau 16) révèle que l'augmentation du pH s'accompagne d'une diminution de la vitesse de dégradation pour le filant mais a peu d'effet sur celle de l'indice de consistance K. Ainsi, la vitesse de dégradation du filant est moitié moins rapide à pH 7 ($k_{ref} = 4,98 \pm 0,64 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$) qu'à pH 5 ($k_{ref} = 9,98 \pm 0,91 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$).

L'observation des E_a montre que c'est à pH 7 qu'il faut apporter le plus d'énergie pour que la dégradation du filant ait lieu ($E_a = 128 \pm 10 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$). Par contre, pour la dégradation de l'indice de consistance K, l'énergie d'activation diminue avec l'augmentation du pH.

La comparaison des paramètres estimés pour modéliser la dégradation du filant et de l'indice de consistance montre que les propriétés élongationnelles des purées se dégradent plus vite ($4,9 < k_{ref} < 10 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$) que leurs propriétés visqueuses ($2,3 < k_{ref} < 3,4 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$).

4. Discussion

Ces résultats confirment et complètent les travaux d'Inyang & Ike (1998), Savouré *et al.* (2020) et Woolfe *et al.* (1977) qui ont constaté l'effet du traitement thermique (blanchiment, cuisson et stérilisation) sur les propriétés texturales du gombo. Comme l'on pouvait s'y attendre, l'augmentation de la température de traitement accélère la dégradation de ces propriétés.

Les résultats de cette étude montrent que l'augmentation du pH diminue la vitesse de dégradation des propriétés filantes du gombo au cours du traitement thermique. Comme la perception sensorielle du gluant est très corrélée à la mesure du filant (Savouré *et al.*, 2021), ces résultats permettent de comprendre pourquoi des sels alcalins sont ajoutés lors de la préparation traditionnelle des sauces gombo (Ngoualem *et al.*, 2019) : l'alcalinisation préalable des sauces permet de ralentir la dégradation de la qualité gluante du gombo au cours de la cuisson.

Etant donné que le degré de méthylation des pectines de gombo est assez faible (< 26 % d'après (Kpodo *et al.*, 2018)), la dégradation de la texture des purées de gombo est certainement la conséquence de la dépolymérisation des pectines de gombo par β -élimination ou hydrolyse acide (Moelants, Cardinaels, Van Buggenhout, *et al.* 2014). L'effet du pH sur la vitesse de dégradation des propriétés texturales du gombo pendant le traitement thermique peut être liée au fait que selon le pH, la réaction de dégradation prépondérante n'est pas la même : les pH acides favorisent l'hydrolyse acide des pectines alors que les pH alcalins favorisent les réactions de β -élimination des pectines (Fraeye *et al.*, 2007). Pour mieux comprendre les leviers sur lesquels il est possible de jouer pour préserver au mieux les propriétés texturales du gombo, il serait donc intéressant d'étudier quels sont les mécanismes biochimiques qui sont impliqués dans ces dégradations et de faire le lien avec les modifications rhéologiques et texturales des suspensions gluantes.

5. Conclusion

Cette étude a permis d'identifier les paramètres cinétiques permettant de décrire, modéliser et prédire l'évolution du filant et de l'indice de consistance K d'une purée de gombo au cours du traitement thermique.

L'analyse des résultats a montré que l'augmentation de la température de traitement entraîne une accélération de la vitesse de dégradation des propriétés texturales du gombo. La comparaison des paramètres cinétiques du filant et de l'indice de consistance K a révélé que les propriétés élongationnelles des purées de gombo se dégradent plus vite que leurs propriétés visqueuses. Alors que le pH n'a pas d'effet sur la vitesse de dégradation de leur indice de consistance K, la dégradation de leurs propriétés filantes est plus rapide à pH 5 qu'à pH 7. Comme la perception sensorielle du gluant est très corrélée à la mesure du filant (Savouré et al., 2021), ces résultats indiquent que pour préserver au mieux les propriétés gluantes du gombo au cours du traitement thermique, il est préférable d'augmenter leur pH au préalable.

Le modèle cinétique d'ordre 1 qui a été développé pour trois pH différents peut à présent être utilisé pour construire un outil qui, une fois couplé avec un modèle de transfert de chaleur dans les purées, permettra de prédire la dégradation de la texture de purées de gombo en fonction des conditions du traitement thermique (barème, valeur stérilisatrice et/ou pasteurisatrice). En considérant que dans une application future, la purée de gombo sera alcalinisée avant d'être traitée thermiquement, les coefficients qui doivent être utilisés pour modéliser l'effet du traitement thermique sur la qualité texturale des purées de gombo sont ceux du filant à pH 7 ($k_{ref} = 4,98 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ et $E_a = 128 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$).

Remerciements:

The authors would like to thank Mr. Nono (AS Food International) for his support and Harouna Chaibou Adamou for his contribution to the thermal stabilisation modelling work.

Les auteurs tiennent à remercier M. Nono (AS Food International) pour son soutien et Awa N'Diaye pour sa contribution au suivi des cinétiques de dégradation.

Pour identifier les paramètres cinétiques permettant de décrire, modéliser et prédire l'évolution de la texture du gombo au cours du traitement thermique, des purées de gombo ont été traitées à 5 températures (70, 85, 100, 115 et 130°C) et 3 pH (5, 6 et 7) différents. Pour chacune d'elles, l'évolution de l'indice de consistance K et du filant était mesurée en fonction du temps de traitement. La dégradation de ces paramètres a été modélisée avec un modèle cinétique d'ordre 1 et l'équation d'Arrhenius.

L'analyse des paramètres cinétiques identifiés a montré que l'augmentation de la température de traitement entraîne une accélération de la vitesse de dégradation des propriétés texturales du gombo. Quelle que soit la température et le pH, les propriétés élongationnelles des purées de gombo se dégradent plus vite que leurs propriétés visqueuses. Alors que le pH des purées n'a pas d'effet sur la vitesse de dégradation de leur consistance, la dégradation de leurs propriétés filantes est moins rapide à pH 7 qu'à pH 5. Ces résultats montrent que pour préserver au mieux les propriétés gluantes des purées de gombo, il est préférable de les alcaliniser avant de les stabiliser thermiquement.

Les paramètres cinétiques identifiés pour décrire la dégradation du filant à pH 7 ($k_{ref} = 4,98 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ et $E_a = 128 \text{ kJ.mol}^{-1}$) ont donc été utilisés pour construire un modèle capable de prédire la qualité texturale finale des purées de gombo en fonction des conditions opératoires du traitement thermique (actions 4 sur la figure 4). Un modèle similaire a été construit pour prédire la qualité finale des trois autres produits finis de l'UMT. Ces modèles sont présentés en Annexe 1 (partie 1.12). Ils ont été utilisés pour développer un outil d'aide à la conception destiné à optimiser la conception de l'UMT (actions 6 et 7 sur la figure 4).

Avant de présenter l'outil d'aide à la conception qui a été développé et utilisé pour concevoir l'UMT, la méthodologie élaborée pour optimiser la conception de l'UMT doit être présentée.

Chapitre 5

Chapitre 5: Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants. Part 1: Methodology (Publication n°3)

Timoty SAVOURE^{a, c}, Martial MADOUMIER^a, Michel RIVIER^{a, b}, Manuel DORNIER^a, Antoine COLLIGNAN^{a*}

^a *Qualisud, Univ Montpellier, CIRAD, Institut Agro, Université d'Avignon, Université de La Réunion, Montpellier, France*

^b *CIRAD, UMR Qualisud, F-34398 Montpellier, France*

^c *AS Food International, Grenoble, France*

* *Corresponding author.*

Projet de publication à soumettre à la revue « Food and Bioproducts Processing »

Abstract:

The design of batch food processing plants is a complex problem that requires the use of advanced simulation and optimization methods. This paper presents how existing methods for multi-scale design and multi-objective optimization can be combined together while carrying out the integrative design of these complex systems. To implement the Methodology for the Integrated, Multi-scale and Multi-Objective Design of Systems (MIMMODS), seven tasks must be performed. The goal of the first 5 tasks is to build a decision support tool that (i) simulates the behavior of the processing plant and estimates its performance, at different functional levels and whatever design variables it is made of, (ii) takes into account the preferences of the decision maker to convert the performances of a design solution into desirability indices and (iii) searches for the design solution(s) that best satisfy the design objectives and the preferences of the decision maker. When the tool is working, a final task is to visualize and analyze the results it generates in order to validate whether the resulting design solution is satisfactory, realistic, feasible and consistent or whether a new iteration of the methodology needs to be conducted to refine the decision support tool.

Key words:

Design methodology; Multi-scale modeling; Multi-objective optimization; Integrated Design; Batch processing plant; Design support tool

1. Introduction

Il existe un intérêt croissant pour le développement de petites unités de transformation alimentaire multi-produit capables d'apporter de la valeur ajoutée aux fruits et légumes produits près des zones de production. Dans ce contexte, les usines de transformation discontinues présentent l'avantage d'être flexibles : pour changer leur production (matières premières, produits finis, recettes et/ou capacité), il est souvent facile de les reconfigurer et/ou de modifier les conditions de fonctionnement des équipements qui les composent (Barbosa-Póvoa, 2007; Moreno & Montagna, 2007). Cependant, dans la littérature en génie des procédés alimentaire peu d'études se concentrent sur la conception d'usines discontinues (voir par exemple Moreno & Montagna, 2007; Simpson *et al.*, 2003). Les études menées en génie chimique sur ce sujet ont montré que c'est un problème très complexe qui nécessite l'utilisation de méthodes de simulation et d'optimisation avancées (Barbosa-Póvoa, 2007; Dietz *et al.*, 2005, 2006) et qu'une approche de conception intégrée peut être pertinente (Koller *et al.*, 2018; Rossi *et al.*, 2017; Vega *et al.*, 2014).

La conception intégrée d'ateliers de transformation consiste à prendre simultanément en compte i) les éléments que le concepteur doit définir lors de la conception de l'atelier (*e.g.* choix des types et des modèles d'équipement, de leur nombre, de leur capacité etc.) et ii) ceux que l'utilisateur doit définir lors de l'exploitation de l'atelier (*e.g.* choix des conditions opératoires et de l'ordonnancement de la production). Cette approche a pour intérêt de permettre la prise en compte, dès la phase de conception, de l'influence des variables de pilotage/contrôle sur les performances globales du système atelier (Baldea & Harjunkoski, 2014; Dimian *et al.*, 2014; Patil *et al.*, 2015). Ce travail nécessite de modéliser, simuler et optimiser ensemble les différents niveaux fonctionnels de l'atelier de transformation (opération unitaire, procédé, atelier). Cette tâche est complexe car les nombreux modèles et outils de simulation qui ont été développés pour décrire les phénomènes qui se produisent à ces différents niveaux (*e.g.* transformations physiques et réactions dans l'aliment pendant l'opération unitaire, flux de matières et d'énergie pendant le process, flux économiques dans l'atelier...) ont souvent des échelles de temps et/ou de longueur qui sont différentes (Baldea & Harjunkoski, 2014). Pour surmonter cette difficulté, les méthodes de modélisation et de conception multi-échelle qui ont été développées dans d'autres domaines de recherche (Ingram *et al.*, 2004; Panchal *et al.*, 2005; Yang & Marquardt, 2009) peuvent être utilisées. En offrant une plus grande flexibilité pendant la conception de « *process systems* », ces méthodes permettent d'optimiser leurs performances et leur durabilité (Martinez-Hernandez, 2017).

La conception d'une usine de transformation alimentaire est intrinsèquement un problème multi-objectif qui peut être résolu en utilisant des méthodes d'optimisation multi-objectifs (MOOM). En génie des procédés alimentaires, la plupart des études qui ont été conduites pour répondre à des problèmes de conception multi-objectifs n'utilisaient que partiellement les éléments constitutifs des MOOM. En effet, pour être complète, une méthode d'optimisation multi-objectifs nécessite de définir et d'implémenter ensemble i) des objectifs de conception associés à des indicateurs de performance, ii) un modèle de simulation du comportement du système à concevoir, iii) un modèle de préférence, iv) une méthode de sélection et, v) un algorithme d'optimisation (Madoumier *et al.*, 2019). À notre connaissance, contrairement à ce qui a été fait en génie chimique (*e.g.* Dietz *et al.*, 2006), les MOOM n'ont jamais été utilisées de façon complète pour concevoir un atelier de transformation alimentaire.

Cet article présente comment les méthodes de conception multi-échelle et les MOOM peuvent être utilisées ensemble pour effectuer la conception intégrée de systèmes complexes, tels que les ateliers discontinus de transformation alimentaire. Après une présentation des

différentes étapes de MIMMODS (Methodology for the Integrated, Multi-scale and Multi-Objective Design of Systems), les opportunités et les défis associés à sa mise en œuvre seront discutés. Par souci de clarté, des termes différents seront utilisés pour distinguer le concepteur de l'atelier (celui qui met en œuvre la méthodologie de conception), le décideur (le commanditaire du travail de conception), le futur utilisateur de l'atelier et les experts qui sont mobilisés pendant le travail de conception.

2. Méthodologie de conception intégrée, multi-échelle et multi-objectif d'ateliers de transformation alimentaire

2.1. Objectifs et aperçu général de MIMMODS

Le Tableau 17 présente les différentes tâches à effectuer pour mettre en œuvre MIMMODS. L'essentiel du travail (tâches n°1 à 5) consiste à construire un outil d'aide à la conception devant permettre :

- i) De simuler le comportement de l'atelier de transformation et d'estimer ses performances, à différents niveaux fonctionnels et quels que soient les éléments dont il est constitué,
- ii) De tenir compte des préférences du décideur pour convertir les performances d'une solution de conception en indices de désirabilité,
- iii) De rechercher la ou les solutions de conception non dominées (au sens de Pareto) qui satisfont au mieux les objectifs de conception et les préférences du décideur.

Lorsque l'outil fonctionne, une étape de visualisation et d'analyse des résultats (tâche n°6) permet de valider que la solution de conception sélectionnée constitue le meilleur compromis possible et qu'elle est réaliste, faisable et cohérente ou si une nouvelle itération de la méthodologie doit être effectuée pour améliorer l'outil d'aide à la conception (tâche n°7).

Chapitre 5: Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants. Part 1: Methodology

Tableau 17 : General overview of MIMMODS. Main goals of each task are summarized. Methods, tools and references that can be used to carry out each task are suggested.

Task	Goals		Example of methods and tools that can be used	Useful references
1. Clarification of the design task and problem statement	Define :	Usage scenario(s) and associated assumptions, environmental constraints and settings	Characterization of user's environment and diagnosis of its needs and constraints	Godjo <i>et al.</i> (2015)
		Design objectives and associated performance indicators	Functional expression of the need and functional performance specification	AFNOR (2013); Cauffriez <i>et al.</i> (2013); J.-J. Wang <i>et al.</i> (2009)
		Design variables	Consultation(s) with user(s) and expert(s)	
2. Development of a multi-scale simulation model of the system to be designed	Define :	System(s) and subsystem(s) to be modeled and their characteristic length and time scales	Systemic analysis	Cuevas (2004); Leung Pah Hang <i>et al.</i> (2016); Yang & Marquardt (2009)
			Multiscale modeling	Ho <i>et al.</i> (2013); Ingram <i>et al.</i> (2004); Li <i>et al.</i> (2005); Panchal <i>et al.</i> (2005); Yang & Marquardt (2009)
		Models of the transformations occurring within each system/sub-system	Modeling of unit operations by using physical and/or reaction models	Bimbenet <i>et al.</i> (2017); Datta (2016); Rao <i>et al.</i> (2005); Trystram, (2012)
			Scheduling of processes with or without a Discrete Event Simulator	Dietz <i>et al.</i> (2005); Jahangirian <i>et al.</i> (2010); Moreno & Montagna (2007); Penazzi <i>et al.</i> (2017); Simpson & Abakarov (2009)
			Modeling of plant economic and environmental performances	Duret <i>et al.</i> (2020); Marouli & Maroulis (2005); Olajire (2020)
		Intersystem and interscale information flows and bridging methods	Parallel/concurrent, serial/sequential or simultaneous bridging methods	E <i>et al.</i> (2007); Ho <i>et al.</i> (2013); Ingram <i>et al.</i> (2004); Panchal <i>et al.</i> (2005)
3. Modeling of preferences and choice of a selection method	Define :	Desirability functions and settings for each performance indicator	Sigmoid functions used by Raffray <i>et al.</i> (2015) or functions of Harrington (1965), Derringer & Suich (1980).	Costa <i>et al.</i> (2011)
		Selection method (aggregation functions are commonly used) Indicators and/or objective weighs	Weighted geometric mean AHP weighting of objectives in combination with FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)	Saaty (1990); Scott & Antonsson (1998); Semassou <i>et al.</i> (2013); H. Wang <i>et al.</i> (2017); Z. Wang <i>et al.</i> (2020)
4. Choice of an optimization method	Define :	Optimization method and algorithm(s)	Genetic Algorithm, Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization	Wari & Zhu (2016); Zhou <i>et al.</i> (2011)
5. Implementation of the design support tool	Define :	Modeling tools and software	Database management systems (e.g. Microsoft Access).	Software marketing companies
	Implement :	Simulation models, preferences models and optimization method	Programing software/languages (e.g. Comsol®, Matlab and Python) and particular libraries associated.	
6. Visualization and result analysis	Visualize and analyze :	The shape, location and distribution of the Pareto approximation to validate that the resulting trade-off solution is satisfactory	Scatter Plot, Level diagrams, Pareto shells, Self-Organizing Maps	He & Yen (2016); Tusar & Filipic (2015)
		The performances and the characteristics of the resulting trade-off solution to validate it is realistic, feasible and consistent	Gantt diagrams	
7. Iterative and systematic refinement of the design support tool	Prioritize:	Possible refinements of the tool	Value-of-information based methods	Messer <i>et al.</i> (2011); Ming <i>et al.</i> (2021); Panchal <i>et al.</i> (2008)
	Implement	The refinements by order of priority		

2.2. Clarification du problème de conception

2.2.1. Définition du scénario d'utilisation

Pour définir le scénario d'utilisation de l'atelier à concevoir, l'environnement d'utilisation de l'atelier ainsi que les contraintes et les besoins des utilisateurs (possibilités d'approvisionnement, opportunités de marché, disponibilité des utilités, accès aux infrastructures, prix des matières premières *etc.*) doivent être caractérisés (AFNOR, 2013). Ce travail permettra de définir le problème de conception (variables et objectifs de conception) et de paramétrer les modèles de simulation et de préférence constituant l'outil d'aide à la conception.

2.2.2. Définition des objectifs de conception et des indicateurs de performance associés

Dans le scénario d'utilisation, les objectifs de conception de l'atelier doivent être définis. Chacun de ces objectifs peut correspondre à une ou plusieurs fonctions (de service et de contraintes) attendues par l'utilisateur. Pour définir, organiser, caractériser et/ou hiérarchiser ces fonctions, la méthode d'analyse fonctionnelle du besoin (AFNOR, 2013; Cauffriez *et al.*, 2013) peut être utilisée.

Un ou plusieurs indicateurs de performances doivent être associés à chaque objectif de conception. Un indicateur de performance permet de quantifier la performance de l'atelier pour un objectif de conception donné et peut être évalué à partir d'un ensemble de modèles plus ou moins complexes. Des exemples d'indicateurs de performance couramment utilisés en génie des procédés agroalimentaires sont présentés dans la revue de Madoumier *et al.* (2019). Afin d'éviter les redondances et pour ne pas complexifier inutilement le problème de conception, les indicateurs sélectionnés doivent être mesurables, interprétables, indépendants et dans l'idéal, peu nombreux (J.-J. Wang *et al.*, 2009).

2.2.3. Définition des variables de conception

Les variables de conception d'un atelier de transformation alimentaire sont tous les éléments qui peuvent avoir un effet sur la/les performances de l'atelier et qui doivent être définies au moment de la conception de l'atelier. On en distingue cinq types.

Pour un atelier de transformation agroalimentaire, il s'agit principalement des variables « équipement ». Ces variables correspondent aux caractéristiques du/des équipements qui composent l'atelier et au nombre de chacun d'eux. Il s'agit par exemple de la famille (*e.g.* raffineuse ou broyeur) ou du type (*e.g.* presse à paquet ou pressoir à bande) d'équipement, de leurs dimensions, des fonctions dont ils disposent (*e.g.* présence d'une trémie d'alimentation, possibilité de fonctionner sous vide *etc.*) et/ou de leurs caractéristiques techniques (*e.g.* capacité, matériaux, dimensions, poids, contrôle commande, utilités nécessaires). Le coût de l'équipement est une résultante directe de ces variables.

Lors d'une démarche de conception intégrée, des variables de conception correspondant aux éléments que l'utilisateur doit définir au moment d'exploiter l'atelier peuvent également être incluses dans le problème de conception. Pour un atelier agroalimentaire, on distingue :

- Les variables « produit » qui sont liées à la recette et/ou à l'emballage (type, matériaux, forme et dimension) des produits finis.

- Les variables « conditions opératoire » qui sont liées aux conditions opératoires appliquées par l'opérateur sur un type d'équipement, pour un produit et une opération unitaire donnés (e.g. température, temps, vitesse, pH etc.)
- Les variables « ressources de production » qui sont liées aux ressources que l'utilisateur doit mobiliser et/ou consommer pour mener le processus de production (e.g. nombre d'opérateurs nécessaires).
- Les variables « politique de production » qui sont liées à l'organisation de la production dans l'atelier. Il peut s'agir du type de campagne de production (simple ou multiple) ou de la durée et du nombre de rotation par jour (1 x 8h, 2 x 8h ou 3 x 8h) par exemple.

Le choix des variables de conception à inclure ou non dans le problème de conception se fait sur la base de l'expertise du concepteur et en fonction des objectifs de conception. Pour chaque variable de conception incluse, les modalités possibles (s'il s'agit d'une variable qualitative ou d'une variable quantitative discrète) ou le domaine de variation (s'il s'agit d'une variable quantitative continue) doivent être définis. Leur combinaison forme une solution de conception. Le problème de conception consiste à trouver la « solution de conception » qui satisfait au mieux les objectifs de conception. Comme le nombre de variables de conception et de modalités possibles conditionnent la taille de l'espace de conception, elles doivent être choisies et définies en tenant compte de leur effet potentiel sur les indicateurs de performance retenus.

2.3. Développement d'un modèle de simulation multi-échelle du système à concevoir

Les interdépendances entre les variables de conception, ainsi que les différents niveaux fonctionnels auxquels elles peuvent être prise en compte pour calculer les indicateurs de performance, rendent complexe la construction du simulateur de l'atelier. De plus, les nombreux modèles développés pour décrire les phénomènes ayant lieu aux différents niveaux fonctionnels de l'atelier ont souvent des échelles de longueur et/ou de temps qui sont différentes. Pour faire face à cette complexité, les systèmes complexes sont souvent décomposés en plusieurs sous-systèmes (e.g. Leung Pah Hang *et al.*, 2016) de façon hiérarchique (Liu *et al.*, 2016; Yang & Marquardt, 2009). Cette façon de faire conduit à développer le simulateur multi-échelle de l'atelier en trois étapes :

- i. Décomposition du système atelier à concevoir en sous-systèmes et identification des échelles caractéristiques pour chaque niveau hiérarchique,
- ii. Définition pour chaque système/sous-système de modèle(s) descriptif(s) approprié(s),
- iii. Définition des interactions et des flux d'informations entre ces sous-système et de la/les méthode(s) de couplage adaptée(s).

2.3.1. Décomposition hiérarchique du système et identification des échelles caractéristiques de chaque niveau

La décomposition hiérarchique de l'atelier en plusieurs sous-systèmes peut se faire en fonction des attributs fonctionnels ou de la structure physique de l'atelier (Cauffriez *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2016). Pour chaque système/sous-système identifié, l'objectif est ensuite de définir quels sont les inputs, les outputs, les frontières, l'environnement, les composants, les sous-systèmes et les transformations opérées en son sein (Cuevas, 2004; Leung Pah Hang *et al.*, 2016; Yang & Marquardt, 2009).

Tous les systèmes/sous-systèmes d'un même niveau hiérarchique ont la même échelle caractéristique, qui doit être définie (Liu *et al.*, 2016; Yang & Marquardt, 2009). En modélisation

multi-échelle, une échelle est définie en tenant compte de la longueur et/ou de la durée caractéristique des objets et/ou des phénomènes observés et/ou modélisés (Ingram *et al.*, 2004). Dans cet article, par souci de clarté, le terme niveau fera référence au niveau d'imbrication des sous-systèmes dans le système modélisé alors que le terme échelle fera référence à l'échelle de temps et/ou de longueur à laquelle tous les systèmes/sous-systèmes d'un même niveau sont modélisés.

Le postulat de cet article est que la conception intégrée d'un atelier de transformation agroalimentaire nécessite de prendre en compte au moins trois niveaux d'intégration (opération unitaire, procédé et atelier) auxquels sont associées trois échelles de temps différentes (minute, heure, mois / année). Mais d'autres niveaux de modélisation peuvent être inclus sur la base de l'expérience du modélisateur et/ou de la littérature disponible (Ingram *et al.*, 2004). Des modèles multi-échelle peuvent par exemple être construits à des échelles inférieures pour prédire les propriétés physiques de certains aliments par exemple (voir le travail de Ho *et al.* (2013) à ce sujet).

2.3.2. Définition des modèles appropriés pour chaque système à chaque échelle

Pour chaque système/sous-système, les éléments suivants doivent être définis (Ingram *et al.*, 2004):

- i) Les hypothèses utilisées pour construire le modèle,
- ii) Les variables qui caractérisent le modèle,
- iii) Les relations (équations constitutive et/ou conservative) entre les variables,
- iv) Les conditions initiales et aux limites,
- v) La valeur des paramètres du modèle et leur incertitude.

Pour chaque niveau fonctionnel de l'atelier, les modèles et les outils les plus adaptés peuvent faire l'objet d'un développement particulier ou être sélectionnés parmi ceux déjà existant. Au niveau de l'opération unitaire, de nombreux modèles et outils de modélisation multi-physique permettent de décrire et simuler l'évolution de la qualité d'un aliment en fonction des équipements et des conditions opératoires (Bimbenet *et al.*, 2017; Datta, 2008, 2016; Trystram, 2012). Au niveau du procédé, les outils de simulation par événements discrets ont montré leur intérêt pour décrire les flux de matière au sein de la ligne, résoudre des problèmes d'ordonnancement et prédire les performances de lignes complètes d'équipements de transformation (Dietz *et al.*, 2005; Jahangirian *et al.*, 2010; Penazzi *et al.*, 2017). Enfin, des modèles existent pour prédire la consommation d'eau et d'énergie, la production de déchets (Duret *et al.*, 2020; Olajire, 2020) et/ou les performances technico-économiques (Marouli & Maroulis, 2005; Vargas-Bautista *et al.*, 2017) au niveau de l'atelier.

Au moment de sélectionner et/ou développer les différents modèles, des critères de parcimonie, d'exactitude, de précision, de spécialisation, d'identifiabilité et de sensibilité (PEPSIS) peuvent être utilisés pour évaluer dans quelle mesure ils sont adaptés à l'outil de simulation et d'optimisation en développement (Madoumier *et al.*, 2019). En particulier, un compromis doit être trouvé entre le temps de calcul d'une part et la précision et l'exactitude de l'outil d'autre part (Liu *et al.*, 2016; Panchal *et al.*, 2005; Sinha *et al.*, 2013).

2.3.3. Nature des flux d'information et définition de la méthode de couplage

Une fois que les modèles appropriés pour chaque système et sous-système ont été sélectionnés et/ou développés, une méthode de couplage doit être définie. Le couplage correspond à la manière avec laquelle les informations qui sont générées et utilisées par les modèles décrivant différents systèmes/sous-systèmes sont gérées et échangées. Le couplage est dit horizontal lorsque le système qui génère l'information et celui qui l'utilise présentent la même échelle caractéristique. Il est dit vertical s'ils ont une échelle différente. Le couplage vertical constitue la principale difficulté de la modélisation multi-échelle (Panchal *et al.*, 2005).

Différentes méthodes de couplage entre les sous-modèles développés à des échelles adjacentes (*e.g.* « parallel » / « concurrent », « serial » / « sequential » or « simultaneous » coupling) ont été décrites dans la littérature (E *et al.*, 2007; Ho *et al.*, 2013; Ingram *et al.*, 2004; Panchal *et al.*, 2005). Pour choisir la méthode de couplage la plus adaptée, la nature de l'interaction et les flux d'informations qui lient les modèles des 2 systèmes doivent être définis. Par exemple, si le flux d'information entre deux échelles est unidirectionnel, et que le nombre de paramètres qui passe d'un modèle à l'autre n'est pas trop important, les 2 modèles peuvent être exécutés l'un après l'autre (on parle alors de couplage en « série » ou « séquentiel »).

Le choix de la méthode de couplage influence la qualité d'un modèle multi-échelle, et notamment le temps de calcul nécessaire. Pour choisir la bonne méthode, le lecteur peut se référer aux nombreux travaux qui ont décrit les avantages, les inconvénients et les conditions d'applicabilité des différentes méthodes de couplage existantes. A noter que lorsqu'il y a plus de 2 échelles à modéliser, plusieurs méthodes de couplage peuvent être combinées au sein d'un seul modèle multi-échelle.

2.4. Modélisation des préférences et choix d'une méthode de sélection

Le nombre important d'indicateurs de performances et les unités différentes dans lesquelles ils sont exprimés, rendent difficile la comparaison des solutions entre elles. Pour surmonter cette difficulté, les méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM) intègrent les préférences du décideur sous la forme de modèles de préférences (Madoumier *et al.*, 2019). On distingue les modèles de préférences qui permettent de convertir la valeur prise par un indicateur en indice de satisfaction (grâce à une fonction de désirabilité) et les modèles de préférences qui permettent de traduire le fait que pour le décideur, les fonctions de service/objectifs n'ont pas tous la même importance relative (exprimée par une pondération).

Dans la méthodologie proposée, la modélisation des préférences consiste à (i) convertir les valeurs des indicateurs de performance en « Indicator Desirability Indices » (IDI) grâce à des fonctions de désirabilité, puis (ii) à agréger ces IDI en tenant compte de l'importance relative des fonctions de service/objectifs pour le concepteur.

2.4.1. Définition et paramétrage des fonctions de désirabilité

Une fonction de désirabilité doit être associée à chaque indicateur de performance. Cette fonction mathématique transforme la valeur prise par un indicateur de performance en un IDI qui quantifie, pour l'objectif de conception auquel il correspond, le degré de satisfaction du décideur (0 = solution inacceptable ; 1 = satisfaction maximale).

Différentes fonctions permettent de traduire le fait que le décideur cherche à maximiser ou minimiser un indicateur de performance ou faire tendre sa valeur vers une valeur cible. Bien

qu'elles ne permettent pas de modéliser les préférences aussi finement que les fonctions de Harrington (1965), les fonctions de désirabilité de Derringer & Suich (1980) sont les plus utilisées (Costa *et al.*, 2011; Madoumier *et al.*, 2019). Quant à elle, la fonction sigmoïde (Raffray *et al.*, 2015) présente l'avantage d'être centrée, symétrique, strictement monotone et de converger vers 0 et 1 suffisamment lentement pour pouvoir discriminer des solutions dans un large domaine de désirabilité.

Le paramétrage des fonctions de désirabilité est un moyen d'intégrer les contraintes imposées par le scénario d'utilisation au problème de conception (Madoumier *et al.*, 2019). Pour identifier/choisir la valeur des paramètres, différentes méthodes (*e.g.* analyse fonctionnelle, études de marché, analyse des valeurs d'échange) peuvent être utilisées.

2.4.2. Définition de la méthode d'agrégation et de la pondération des objectifs

Généralement, pour identifier la meilleure solution de compromis, la méthode consiste à agréger les indices de désirabilité obtenus puis à classer les solutions en fonction de leur niveau de satisfaction global (Madoumier *et al.*, 2019).

Si plusieurs indicateurs de performance ont été définis pour un même objectif de conception, les IDI correspondant doivent être agrégés afin d'obtenir un seul indicateur de satisfaction (ODI) pour cet objectif. Les ODI peuvent ensuite être à leur tour agrégés en un GDI (voir par exemple Quirante *et al.* (2013), Raffray *et al.* (2015) et Sebastian *et al.* (2010)).

La fonction d'agrégation doit être choisie avec attention car elle peut influencer fortement les résultats obtenus (Madoumier *et al.*, 2019; Z. Wang & Rangaiah, 2017). D'après (Scott & Antonsson, 1998), les deux fonctions d'agrégation appropriées à la conception sont:

- La moyenne géométrique pondérée qui permet de prendre en compte l'importance relative des fonctions de service/objectifs pour le décideur, lors de l'agrégation des IDI correspondant en ODI (et/ou lors de l'agrégation des ODI en un GDI). Pour estimer les poids à attribuer aux IDI et/ou aux ODI, une façon de faire est de classer les fonctions de service/objectifs auxquels ils correspondent par ordre d'importance, grâce à la méthode FMECA (« Failure Mode Effects and Criticality Analysis ») puis d'utiliser la méthode AHP (« Analytic Hierarchy Process », (Saaty, 1990)) comme cela a été fait par Semassou *et al.* (2013). D'autres méthodes de priorisation et de pondération des objectifs sont présentées dans les revues de Madoumier *et al.* (2019) et de J.-J. Wang *et al.* (2009).
- La fonction d'agrégation minimum qui n'est pas pondérée et qui ne nécessite donc pas de connaître les préférences du décideur pour les différents indices de désirabilité (IDI ou ODI) à agréger.

2.5. Sélection d'une méthode d'optimisation

Étant donné que le nombre de solutions de conception possibles est très important, un outil d'optimisation est nécessaire pour rechercher efficacement la/les solutions les plus satisfaisantes. Les méthodes fondées sur des méta heuristiques stochastiques basées sur la population (*e.g.* Genetic Algorithm, Ant Colony Optimization, Differential Evolution et Particle Swarm Optimization) sont les plus utilisées pour optimiser des systèmes. En effet, elles sont adaptées aux problèmes combinatoires et permettent de converger rapidement vers un ensemble de solutions optimales, même quand l'espace de conception est très large et contient des optimums locaux. De plus, elles permettent de maximiser directement un ou plusieurs objectifs sans avoir à formuler son/leur expression sous forme algébrique. Pour

sélectionner la méta heuristique d'optimisation la plus adaptée, différents critères peuvent être pris en compte comme son adéquation à la manière avec laquelle le problème a été formalisé, la facilité avec laquelle elle peut être implémentée, sa vitesse de résolution et la précision de la solution qu'elle permet d'obtenir (Madoumier *et al.*, 2019; Wari & Zhu, 2016).

Les modèles de préférences peuvent être intégrés avant, pendant et/ou après le processus d'optimisation (Purshouse *et al.*, 2014). Cela peut jouer sur le nombre d'objectifs à optimiser et sur le choix de l'algorithme:

- L'intégration a priori des préférences permet de convertir le problème multi-objectif en un problème mono-objectif (le GDI). Mais cela suppose que le décideur ait une bonne compréhension du problème et soit certain de ses préférences avant l'optimisation. Dans ce cas, selon l'algorithme, une (ou plusieurs) solution(s) optimale(s) peut/peuvent être générée(s).
- Si le décideur dispose d'une compréhension partielle du problème, il peut intégrer ses préférences pendant et/ou après l'optimisation. Dans ce cas, les indicateurs de performance, les IDI ou les ODI peuvent être utilisés comme fonctions objectifs à optimiser et un « multi-objective evolutionary algorithm » doit être utilisé pour rechercher une approximation du front de Pareto (Zhou *et al.*, 2011). Le GDI peut ensuite être utilisé pour classer les solutions non-dominées obtenues et identifier celle qui est globalement la plus satisfaisante.

2.6. Implémentation de l'outil d'aide à la conception

2.6.1. Architecture de l'outil et flux d'informations

La Figure 24 présente l'architecture générale de l'outil d'aide à la conception auquel la méthodologie permet d'aboutir. L'ajout d'un modèle de simulation multi-échelle, nécessaire pour la conception intégrée d'un atelier de transformation, constitue la principale amélioration apportée aux outils mis au point et utilisés par Quirante *et al.* (2013), Raffray *et al.* (2015), Rivier (2017) et Sebastian *et al.* (2010).

La partie supérieure de la Figure 24 représente le modèle de simulation multi-échelle qui doit permettre de calculer l'ensemble des indicateurs de performances pour chaque solution de conception. Une échelle de temps caractéristique est associée à chaque niveau fonctionnel de l'atelier. La formalisation reprend l'ontologie « Function-Behaviour-Structure » de Gero & Kannengiesser (2014). Pour chaque variable de conception, une des modalités/valeurs possibles est sélectionnée afin de constituer une solution de conception (étape 1. « Structure »). Elles sont ensuite utilisées en entrée des modèles qui simulent le comportement de l'unité aux niveaux opération unitaire, procédé et atelier (étape 2. « Behaviour »). Ces modèles permettent de calculer i) les variables intermédiaires qui sont nécessaires aux modèles des niveaux supérieurs et/ou ii) les indicateurs qui quantifient les performances fonctionnelles du système à un niveau donné (étape 3. « Function »). Les informations générées au(x) niveau(x) inférieur(s) sont transmises de façon unidirectionnelle et séquentielle au(x) niveau(x) supérieur(s) et chaque niveau de simulation est associé à plusieurs indicateurs de performance (cela correspond au flux d'information de type « dependent-multifunctional » de Panchal *et al.* (2005)).

La partie inférieure de la Figure 24 représente le système d'optimisation multi-objectif qui a pour fonction de rechercher la/les solution(s) de conception la/les plus satisfaisante(s). Les indicateurs de performance sont transformés en indices de désirabilité (IDI) puis sont agrégés en ODI et/ou en GDI (étape 4). Selon le moment auquel les préférences sont intégrées,

l'algorithme d'optimisation cherche à optimiser plusieurs ODI ou le GDI, en modifiant de façon itérative la valeur des variables de conception (étape 5 → étape 1).

La partie centrale de la Figure 24 représente le scénario d'utilisation en fonction duquel l'outil de simulation et d'optimisation est paramétré. Celui-ci permet de définir (i) les variables de conception et les modalités/valeurs possibles pour chacune d'elles, (ii) les valeurs des paramètres utilisés par les modèles de simulation (rendements d'extraction, prix des inputs et des outputs etc.), (iii) les objectifs de conception et les indicateurs de performance associés, (iv) les paramètres des fonctions de désirabilités associées aux différents indicateurs de performance et (v) le poids relatif des IDI et/ou des ODI à utiliser lors de l'agrégation pondérée. Eventuellement, certains paramètres peuvent être modifiés de façon à tester différents scénarios d'utilisation (voir par exemple Sebastian *et al.* (2010) et Koller *et al.* (2018).

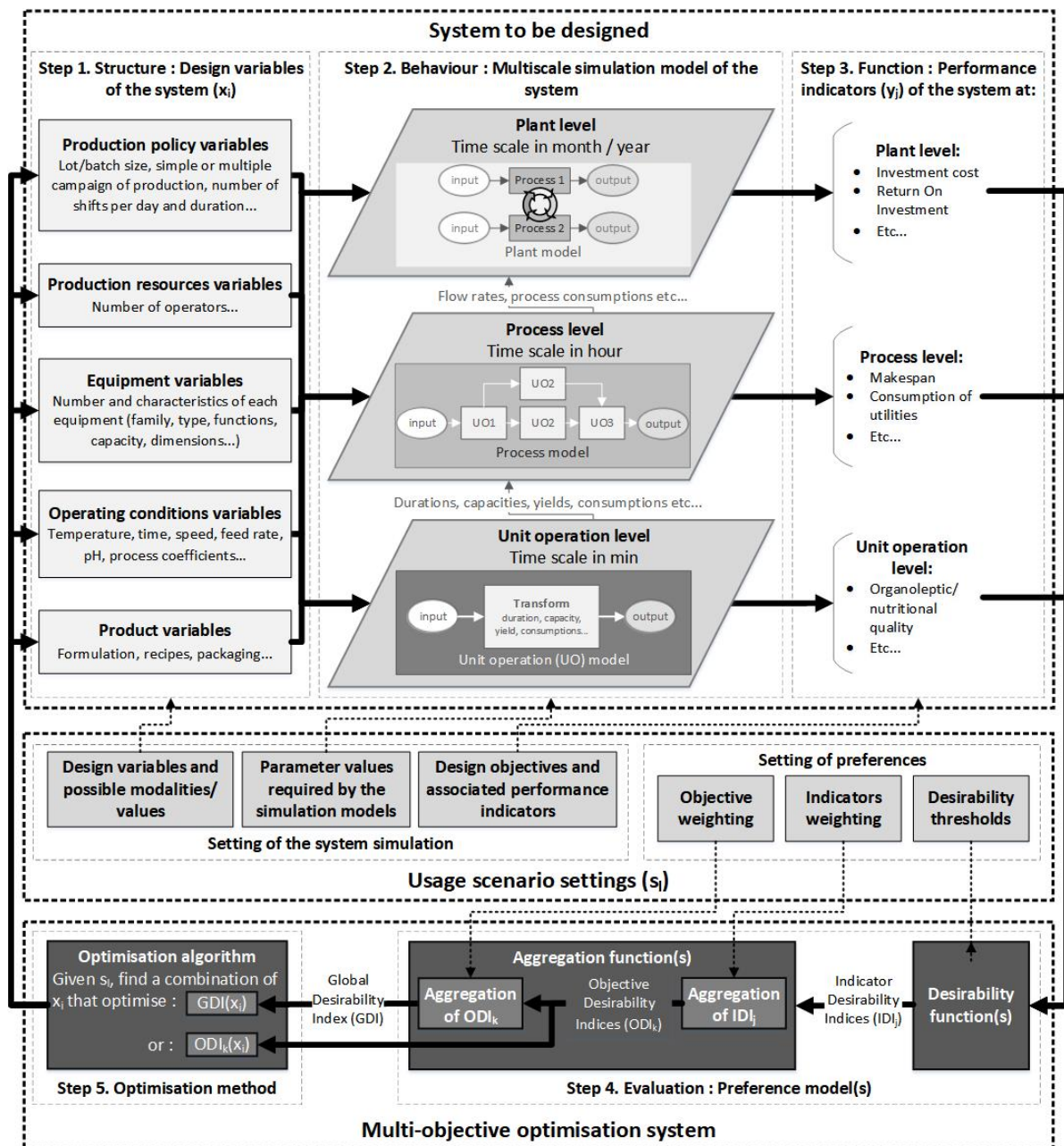


Figure 24 : Architecture and information flows of the multiscale and multi-objective optimization tool for the design of a food processing plant.

2.6.2. Sélection des outils de modélisation

De nombreux langages et logiciels informatiques sont disponibles et peuvent être utilisés pour implémenter l'outil. Leur choix dépend des modèles de simulations et de l'algorithme d'optimisation retenus. Pour implémenter et résoudre les modèles qui permettent de simuler l'évolution de la qualité et des propriétés physico-chimiques d'un aliment au cours d'une opération unitaire, des logiciels de modélisation multi-physique peuvent être utilisés (e.g. Comsol Multiphysics®, ANSYS, Abaqus...). Différents langages de programmation peuvent être utilisés pour automatiser les simulations effectuées par ces logiciels (e.g. Matlab avec Comsol Multiphysics), pour implémenter un simulateur d'événements discrets (e.g. librairie Simpy de Lünsdorf & Scherfke (2020) sous Python) et/ou un algorithme d'optimisation (e.g. librairie DEAP de Fortin et al. (2012) sous Python). En cas de couplage séquentiel, des systèmes de gestion de bases de données (e.g. Microsoft Access) peuvent être utilisés pour gérer et stocker les informations générées par les différents modèles entre les étapes de calcul. Au cas où plusieurs outils doivent être combinés ensemble, une attention particulière devra être portée à leur inter compatibilité les uns avec les autres.

2.7. Visualisation et analyse des résultats

Comme les résultats qui sont générés par l'outil d'aide à la conception sont nombreux et multidimensionnels, leur analyse doit se dérouler en deux temps. En premier lieu, la solution qui a le meilleur GDI doit être comparée avec les autres solutions non-dominées afin de valider qu'elle constitue le meilleur compromis possible pour le décideur. Et en second lieu, son contenu et ses performances doivent être analysées afin de vérifier et valider qu'elle est réaliste, faisable et cohérente.

En général, il n'existe pas de solution qui optimise simultanément tous les objectifs de conception (Zhou *et al.*, 2011). Pour mieux comprendre le problème de conception et comment les préférences du décideur induisent des compromis entre les objectifs, la solution qui a le meilleur GDI doit être comparée avec les autres solutions non-dominées. Pour cela, différentes méthodes de visualisation du front de Pareto peuvent être utilisées. Lorsqu'il y a 2 à 3 objectifs, une méthode simple, rapide et robuste consiste à générer des « scatter plots » pour visualiser la localisation, la forme et la distribution du front de Pareto. Si le nombre d'objectif reste limité, des « bubble charts » peuvent être utilisés (jusqu'à 5 objectifs) ou bien les « bi-objectives scatter plots » peuvent être représentées sous forme matricielle. Lorsque le nombre d'objectifs devient plus important, des méthodes spécifiquement conçues pour visualiser les approximations de fronts de Pareto multidimensionnels (e.g. Distance and Distribution Charts, Interactive Decision Maps, Hyper-Space Diagonal Counting, Two-stage Mapping, Level diagrams, Hyper-Radial Visualization, Pareto Shells, Seriated Heat maps, Multidimensional Scaling, Orthogonal Prosections) ou bien des méthodes de visualisation de données multidimensionnelles de type « parallel coordinate » (e.g. parallel coordinates, heat maps), « mapping » (e.g. Radial coordinate visualization, Sammon mapping, Neuroscale, Self-Organizing Maps, Principal Component Analysis, Isomap) ou « aggregation tree » peuvent être utilisées. Pour choisir la méthode adaptée, le lecteur peut consulter les travaux de He & Yen (2016) et de Tusar & Filipic (2015) qui détaillent les principes et les propriétés de ces méthodes, et qui fournissent des exemples des visualisations graphiques qu'elles permettent d'obtenir.

Une fois que la solution de compromis la plus satisfaisante est sélectionnée, une dernière étape vise à vérifier et valider qu'elle est faisable et que son contenu est réaliste et cohérent. Pour cela, il est possible de visualiser en détail les performances prédites par le modèle pour

chaque niveau fonctionnel (e.g. diagramme de Gantt au niveau de l'atelier et ventilation des coûts au niveau de l'atelier).

2.8. Amélioration itérative de l'outil d'aide à la conception

Pour mettre en œuvre la méthodologie de façon efficace, des itérations sont nécessaires. Ces itérations doivent permettre de construire, d'utiliser et d'améliorer l'outil progressivement. La façon avec laquelle les différentes tâches de MIMMODS s'articulent les unes avec les autres pendant la mise en œuvre de la méthodologie et de ses itérations est schématisée sur la Figure 25.

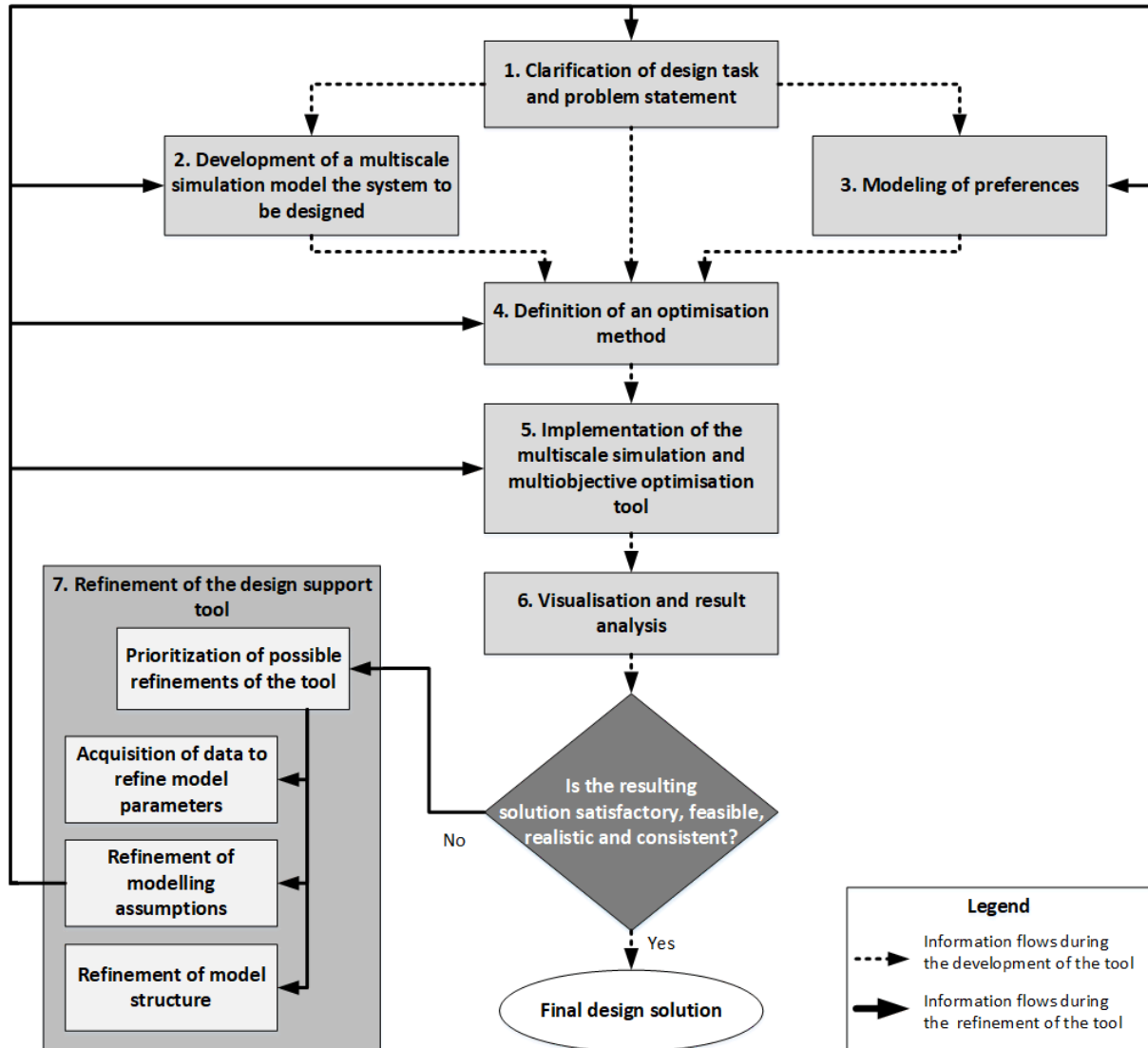


Figure 25 : Schematic representation of the information flows between the different steps of MIMMODS and its iterations.

Après chaque utilisation de l'outil, l'étape de visualisation et d'analyse des résultats doit permettre de décider si la solution de conception, vers laquelle l'outil a convergé, est satisfaisante, faisable et cohérente. Lorsque ces conditions sont remplies, le processus itératif d'amélioration de l'outil peut être clos. Si ce n'est pas le cas, la visualisation des résultats doit permettre d'identifier un ensemble d'améliorations possibles. Par exemple, la comparaison des indices de désirabilité de la solution obtenue avec ceux d'autres solutions permet de

questionner le décideur sur ses préférences et l'invite à les valider ou à les modifier. L'observation détaillée des performances de la solution obtenue lui permet également de valider la valeur des paramètres, les hypothèses et les modèles de simulation qui ont été définis ou bien d'identifier quelles sont les corrections à effectuer.

Comme les ressources disponibles pour améliorer l'outil sont souvent limitées, elles doivent être allouées stratégiquement. Cependant, les modèles contenus dans l'outil ne contribuent pas tous aux résultats dans les mêmes proportions. Par conséquent, après chaque itération, les améliorations possibles (raffinement des hypothèses et/ou des paramètres et/ou de la structure des modèles) doivent être priorisées en tenant compte du rapport entre leur utilité potentielle pour la décision de conception (amélioration de la faisabilité, de la cohérence et du degré de satisfaction de la solution retenue) et le coût de leur mise en œuvre (acquisition de données expérimentales pour mesurer ou identifier des paramètres ; temps pour implémenter les modifications ; temps de simulation/optimisation supplémentaire, etc.). Dans la littérature, beaucoup de méthodes basées sur la valeur de l'information ont été développées et peuvent être utilisées pour prioriser les améliorations à effectuer (e.g. Messer et al., 2011; Ming *et al.*, 2021; Panchal *et al.*, 2008).

3. Opportunités et défis relatifs à la mise en œuvre de la méthodologie

3.1. Opportunités

L'utilisation de MIMMODS doit permettre de surmonter des difficultés qui sont couramment rencontrées lors de la conception d'ateliers de transformation alimentaire discontinus. En effet il est difficile :

- 1) D'optimiser la conception d'un atelier dans son ensemble car ses performances dépendent à la fois de sa structure (qui doit être choisie au moment de la conception) et des conditions dans lesquelles il sera exploité et piloté (qui sont inconnues et/ou incertaines au moment de la conception).
- 2) De simuler le fonctionnement d'un atelier de transformation discontinu pour prédire l'ensemble de ses performances technico-économiques et optimiser sa conception. En effet, un atelier de transformation discontinu est un système complexe composé de plusieurs niveaux fonctionnels (opération unitaire, procédé, atelier) et au sein desquels les phénomènes continus (réactions, flux, transformations) et les événements discrets (e.g. chargement, exécution et déchargement des équipements batch) qui se produisent ont des échelles de longueur et/ou de temps caractéristiques différentes.
- 3) De rechercher et d'identifier la solution de conception la plus satisfaisante car les objectifs de conception affectés à un atelier de transformation correspondent à différents niveaux fonctionnels et peuvent être nombreux et contradictoires.

Dans ce contexte, la méthodologie présente un triple intérêt.

- 1) Tout d'abord, la conception intégrée a le potentiel de générer des solutions plus performantes que la conception séquentielle (Koller & Ricardez-Sandoval, 2017). En effet, dans une approche de conception séquentielle, comme les conditions opératoires et l'ordonnancement de production sont optimisées indépendamment et après la conception de l'atelier, elles sont inconnues ou incertaines au moment de la conception. Le grand nombre d'hypothèses dont elles font donc l'objet (souvent utilisation du pire scénario) peut alors conduire à une structure d'atelier sub-optimale (e.g. surdimensionnement et surcoût de certains éléments, infaisabilité dans certaines

situations). La conception intégrée limite ce problème en permettant la prise en compte, dès la phase de conception, des interactions entre la structure d'atelier, les conditions opératoires et l'ordonnancement de production.

- 2) La modélisation systémique et multi-échelle de l'atelier de transformation permet de construire un simulateur adapté (i) à la complexité d'un atelier de transformation, (ii) à la diversité de variables de conception permise par la conception intégrée et (iii) au grand nombre d'indicateurs de performance nécessaire pour l'optimisation multi-objectif. La représentation de l'atelier comme un système hiérarchique complexe facilite le travail de modélisation visant à prédire ses performances à différents niveaux fonctionnels (opération unitaire, procédé, atelier) en fonction de variables de conception liées à sa structure (nombre et modèles d'équipements qu'il contient) et à son pilotage/gestion (variables produits, conditions opératoires, ressources de production et politique de production). La mobilisation des concepts, des outils et des méthodes de la modélisation multi-échelle complète cette représentation systémique (Yang & Marquardt, 2009) en rendant possible la modélisation des flux (de matière, d'énergie, de valeur, d'information...) et des interactions entre des systèmes ayant des échelles caractéristiques différentes (couplage vertical) ou identiques (couplage horizontal). Le couplage de tous les modèles permet d'aboutir à un simulateur global de l'atelier de transformation à concevoir.
- 3) Les outils et méthodes à implémenter dans MIMMODS permettent de surmonter les difficultés liées à la conception multi-objectif. En permettant de convertir et d'agrèger le grand nombre d'indicateurs de performances en indices de désirabilité (IDI, ODI et GDI), l'utilisation de fonctions de désirabilité et de fonctions d'agrégation pondérées permet de prendre en compte les préférences du décideur pendant la recherche des solutions les plus satisfaisantes puis au moment de filtrer et/ou classer les solutions candidates les unes par rapport aux autres. Enfin, les outils de visualisation facilitent l'analyse des résultats pour (i) vérifier et valider que la solution retenue par l'outil d'aide à la conception constitue le meilleur compromis possible, (ii) mieux comprendre la nature et l'intensité des compromis qui doivent être réalisés et (iii) vérifier que la solution obtenue est faisable, réaliste et cohérente.

3.2. Défis

La méthodologie proposée dans cet article s'accompagne de plusieurs challenges. D'une part, sa mise en œuvre peut-être plus complexe et plus longue que les démarches utilisées traditionnellement en conception. D'autre part, il est difficile d'appréhender et de gérer efficacement les multiples incertitudes qui sont contenues et propagées dans l'outil d'aide. Pour faire face à ces difficultés de façon efficiente, la méthodologie doit être mise en œuvre de façon itérative.

3.2.1. Complexité liée à la construction de l'outil d'aide à la conception

Les degrés de libertés rendus possibles par la combinaison de la conception intégrée, de la simulation multi-échelle et de l'optimisation multi-objectif se traduisent par une complexité accrue pour définir le problème de conception, modéliser le fonctionnement de l'atelier et implémenter l'outil.

En permettant de considérer certaines variables de pilotage (variables produits, conditions opératoires, ressources de production et politique de production) comme des variables de conception (plutôt que comme des paramètres à définir dans le scénario d'utilisation), la conception intégrée offre des degrés de liberté importants. Cependant, comme la taille de

l'espace de conception et le temps de calcul nécessaire à l'outil, pour converger vers les solutions la/les plus satisfaisante(s), augmentent avec le nombre de variables de conception et de modalités/valeurs possibles pour chacune d'elles, le nombre de variables de pilotage à intégrer parmi les variables de conception doit rester modéré. Mais avant de construire l'outil d'aide, il peut être difficile d'estimer quelles sont les variables de pilotage (et les modalités/valeur possibles associées) qui doivent être incluses ou exclues du problème de conception (*i.e.* celles qui doivent être définies comme variables de conception et celles qui doivent être fixées dans le scénario d'utilisation). En effet, cela nécessite de disposer du niveau d'expertise suffisant pour connaître quelles sont les variables de pilotage dont les interactions avec les variables de structure auront un effet important sur les performances de l'atelier et donc sur le choix de la structure d'atelier. Cela peut être particulièrement difficile si le concepteur n'a pas l'expérience suffisante pour bien comprendre le problème de conception et/ou s'il a des difficultés à définir le scénario d'utilisation et/ou les objectifs.

La définition des objectifs de conception et des indicateurs de performance associés peut également être une source de complexité. En effet, du fait des dimensions multi-échelle et multi-objectifs du problème de conception, un grand nombre de fonctions (de contraintes et/ou de service) sont possibles et un grand nombre d'indicateurs de performance peut être calculé. Cette multiplication d'indicateurs peut complexifier et alourdir la modélisation de l'atelier car (i) un modèle prédictif et les paramètres associés sont nécessaires pour chaque indicateur et (ii) la modélisation des préférences nécessite de définir des seuils de préférences pour chaque indicateur). Bien qu'il soit donc nécessaire de conserver un nombre raisonnable d'objectifs de conception et d'indicateurs de performance, il peut être difficile d'identifier a priori quels sont ceux qui doivent être inclus ou exclus du problème de conception.

La modélisation multi-échelle de l'atelier présente plusieurs challenges (Panchal *et al.*, 2005). La principale difficulté consiste à intégrer de façon cohérente et efficace le grand nombre d'informations qui sont utilisées et générées par les différents modèles de simulation pour prédire le comportement global du système atelier. Le choix de la/des méthode(s) de couplage est déterminant car il conditionne l'infrastructure logicielle qui peut/doit être utilisée pour implémenter l'outil. Les importants temps de calcul ainsi que la synchronisation des informations générées par les modèles à différentes échelles / niveaux de simulation et leur stockage dans une base de données font partie des problèmes qui sont souvent rencontrés en modélisation multi-échelle.

3.2.2. Complexité liée aux incertitudes et à leur gestion

Lors de la construction de l'outil, la formulation des modèles et la définition de leurs paramètres est associée à plusieurs types d'incertitudes (Choi *et al.*, 2008; Schuëller & Jensen, 2008). Un premier type d'incertitude est lié à la structure des modèles : des approximations et/ou des simplifications doivent être effectuées pour modéliser certains phénomènes complexes puis pour résoudre numériquement ces phénomènes (*e.g.* discrétisation). Un second type d'incertitude est lié à la valeur des paramètres des modèles: comme certaines données sont insuffisantes et/ou imprécises (*e.g.* caractéristiques réelles de certains équipements, cinétique de dégradation de la qualité d'un aliment au cours d'une opération unitaire, préférences du décideur *etc.*), des hypothèses et/ou des facteurs de sécurité doivent être utilisés pour définir leur valeur. Ces incertitudes, dites épistémiques, s'ajoutent aux incertitudes aléatoires (induites par la nature stochastique des phénomènes modélisés) et peuvent s'atténuer et/ou s'amplifier lors de leur propagation dans les chaînes de modèles contenues dans l'outil (Allen *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2008; Schuëller & Jensen, 2008). Les incertitudes propagées sont plus ou moins problématiques selon qu'elles ont un effet plus

ou moins fort sur les indicateurs de performance et/ou de désirabilité qui sont prédits par le simulateur, et donc sur les solutions de conception vers lesquels l'outil converge. Par exemple, les incertitudes contenues dans les modèles de simulation peuvent conduire à sélectionner une solution de conception dont les performances sont très sensibles aux variations d'un ou de plusieurs paramètres d'entrée (Quirante, 2012; Schuëller & Jensen, 2008). Celles contenues dans les modèles de préférences peuvent conduire à sélectionner une solution infaisable (H. Wang *et al.*, 2017)-et/ou non satisfaisante. La prise en compte et la gestion des multiples incertitudes qui sont contenues et propagées dans l'outil constituent donc un challenge important de la méthodologie.

Différentes méthodologies ont été développées pour gérer et réduire les incertitudes de façon stratégique et efficace (*e.g.* Ming *et al.*, 2021; Panchal *et al.*, 2005; Sinha *et al.*, 2013). D'autres méthodologies, comme la « Robust Design Optimization » (Allen *et al.*, 2006; Bertsimas *et al.*, 2010; Nemirovski, 2019; Quirante, 2012) ou la « Reliability-Based Design Optimization » (Dawei *et al.*, 2021) visent à atténuer les effets des incertitudes sur la décision de conception (Panchal *et al.*, 2013; Schuëller & Jensen, 2008). Cependant, la mise en œuvre de la plupart de ces méthodologies nécessite de réaliser une analyse de sensibilité (i) lorsqu'une première version de l'outil est finalisée afin d'identifier quelles incertitudes réduire en priorité (voir par exemple la méthodologie proposée par Ming *et al.*, 2021) ou bien (ii) pendant le processus d'optimisation pour évaluer la fiabilité (probabilité de défaillance) ou la robustesse (sensibilité aux incertitudes) des solutions de conception. Or, compte tenu du nombre d'inputs du modèle de simulation et de son caractère multi-échelle (*cf.* Figure 24), le coût en temps de calcul qui peut être nécessaire pour propager les incertitudes dans l'outil peut être prohibitif. Selon la complexité de l'outil, il peut donc être difficile de mettre en œuvre les méthodes de gestion des incertitudes existantes, dans le cadre de MIMMODS.

4. Conclusion

Cet article présente une méthodologie de conception intégrée d'ateliers de transformation alimentaire (MIMMODS) qui agence de manière cohérente et organisée les méthodes de conception multi-échelle et les méthodes d'optimisation multi-objectifs existantes. Les lignes directrices qui doivent être suivies pour la mettre en œuvre ont été décrites et le but des 7 étapes à suivre a été détaillé. Cet article fournit également des exemples de méthodes, d'outils et de références bibliographiques qui peuvent être utilisés pour mener à bien chacune d'elles. Enfin, les opportunités et les défis associés à la mise en œuvre de MIMMODS ont été présentés et discutés.

La méthodologie doit à présent être appliquée à un problème de conception concret afin d'illustrer comment les différentes étapes peuvent être mises en œuvre ainsi que pour montrer l'intérêt d'utiliser cette méthodologie.

La présentation de la méthodologie MIMMODS a montré comment les méthodes de modélisation multi-échelle et de conception multi-objectif peuvent être combinées, au sein d'une méthodologie globale, pour optimiser la conception d'un atelier de transformation alimentaire.

L'objectif du chapitre 6 est d'illustrer comment les 7 étapes méthodologiques de MIMMODS ont été mise en œuvre pour concevoir l'UMT d'AS FOOD INTERNATIONAL. Pour rappel, l'unité mobile de transformation de fruits et légumes doit satisfaire les 8 objectifs de conception suivants:

- 1) Etre déplaçable au sein des zones de production enclavées,
- 2) Etre flexible quant aux types de fruits et légumes et de produits finis qu'elle permet de transformer,
- 3) Etre viable économiquement pour ses utilisateurs,
- 4) Garantir la qualité sanitaire, organoleptique et nutritionnelle des produits finis,
- 5) Etre opérable dans des zones enclavées malgré l'accès contraint aux utilités,
- 6) Etre ergonomique d'utilisation malgré l'espace limité à l'intérieur du container qui la contient,
- 7) Permettre une utilisation efficiente des utilités disponibles,

Etre assemblable et maintenable localement.

Chapitre 6

Chapitre 6: Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants. Part 2: Application to a mobile fruit and vegetable processing unit (Publication n°4)

Timoty SAVOURE ^{a, c}, Martial MADOUMIER ^a, Michel RIVIER ^{a, b}, Manuel DORNIER ^a, Antoine COLLIGNAN ^{a*}

^a *Qualisud, Univ Montpellier, CIRAD, Institut Agro, Université d'Avignon, Université de La Réunion, Montpellier, France*

^b *CIRAD, UMR Qualisud, F-34398 Montpellier, France*

^c *AS Food International, Grenoble, France*

* *Corresponding author.*

Projet de publication à soumettre à la revue « Food and Bioproducts Processing »

Key words:

Multi-objective optimisation; Multi-scale modeling; Discrete Event Simulation; Integrated Design; Mobile Processing Plant; Multiproduct batch plant

1. Introduction

Dans les pays en développement, en particulier en Afrique, l'enclavement des zones de production et le faible développement des infrastructures de transport et de transformation alimentaire sont à l'origine d'importantes pertes post-récolte. De plus, le caractère saisonnier de la production des cultures et le coût des investissements font qu'il est difficile pour les unités de transformation locales d'être économiquement rentables (Gustavsson, 2011). Dans ce contexte, Costa & Delgado (2019) ont montré que le déplacement d'unités de transformation mobiles et autonomes d'une zone rurale à une autre, en fonction des calendriers de récolte, est une solution prometteuse pour réduire les pertes post-récolte. Cette expérience montre que dans le secteur agroalimentaire, les modules de production "plug-and-play", reconfigurables, modulaires, mobiles et conteneurisés, qui ont été décrit par Marcotte & Montreuil (2016), peuvent constituer une solution pertinente dans certains contextes. En Europe, le récent démarrage du projet « Food processing in a Box » (Moller et al., 2020) montre aussi que les unités mobiles de transformation alimentaire font l'objet d'un intérêt nouveau.

La conception d'unités mobiles de transformation (MPU) alimentaire est un travail complexe. En effet, en plus d'objectifs couramment pris en compte lors de la conception d'usines de transformation agro-alimentaires (viabilité économique et qualité des produits finis), la mobilité impose de prendre en compte des contraintes spécifiques. D'une part, la conteneurisation des MPU contraint l'espace au sol disponible pour implanter et opérer les différents équipements de transformation. D'autre part, le déplacement et l'installation de ces unités sur différents lieux génère des contraintes importantes quant aux utilités disponibles (eau et énergie). Enfin, leur caractère modulaire et reconfigurable leur confère une flexibilité accrue et un caractère multi-produit mais nécessite de privilégier des équipements discontinus.

La « Methodology for the Integrated, Multi-scale and Multi-Objective Design of Systems » (MIMMODS) qui a été décrite par dans le chapitre 5 permet d'optimiser la conception d'atelier discontinus de transformation alimentaire. Cette méthodologie en 7 étapes consiste à construire un outil d'aide à la conception capable de simuler le fonctionnement de l'atelier de transformation à concevoir et de rechercher la solution de conception qui satisfait au mieux les objectifs de conception et les préférences du décideur. Quand l'outil est fonctionnel, les résultats générés doivent être visualisés et analysés pour valider si la solution obtenue est suffisamment satisfaisante, faisable et cohérente ou si une nouvelle itération de la méthodologie doit être effectuée pour l'améliorer conception.

L'objectif de cette étude est d'illustrer comment les différentes étapes de MIMMODS peuvent être mises en œuvre pour concevoir un atelier de transformation alimentaire. Le cas d'étude consiste à concevoir une unité mobile et multi-produit de transformation de fruits et légumes pour la Côte d'Ivoire.

2. Développement d'un outil d'aide à la conception en utilisant la méthodologie MIMMODS

2.1. Clarification du problème de conception

En Côte d'Ivoire, les fruits et légumes disponibles varient selon les bassins de production et selon les saisons. Dans chaque zone de production, il existe des transformateurs semi-industriels intéressés pour louer et opérer un module « plug and play » de transformation de fruits et légumes pendant une partie de l'année. Le but du travail est de concevoir une MPU qui réponde au mieux à leurs besoins.

2.1.1. Scénario d'utilisation

La MPU est un atelier discontinu et multi produit de transformation de fruits et légumes. Elle est composée d'un ensemble d'équipements de transformation et d'un container. L'ensemble est déplacé sur un semi-remorque par un véhicule tracteur et est positionné sur le site de chaque utilisateur grâce à un système de levage. La MPU doit être flexible vis-à-vis des matières premières qu'elle peut transformer, des types de produits finis qu'elle peut produire (purées, nectars et/ou jus) et des emballages (type et format) qu'elle permet d'utiliser. La Figure 26 présente l'enchaînement des opérations unitaires (UO) qui permettent d'obtenir les quatre produits finis retenus et les équipements associés. Les purées de gombo (OP) et les purées de mangue (MP) sont conditionnées dans des sachets souples de 500 ou de 1000g. Le nectar de mangue (MN) et le jus d'ananas (PJ) sont formulés avec de l'eau et du sucre et sont conditionnés dans des bouteilles en verre (330 ou 1000 mL). Les transferts entre les UO sont effectués manuellement à l'aide de cuves de transferts (35 kg de capacité, 49 cm de diamètre). Le faible niveau de compétence technique des opérateurs locaux implique de choisir des équipements simples d'utilisation, robustes et réparables localement.

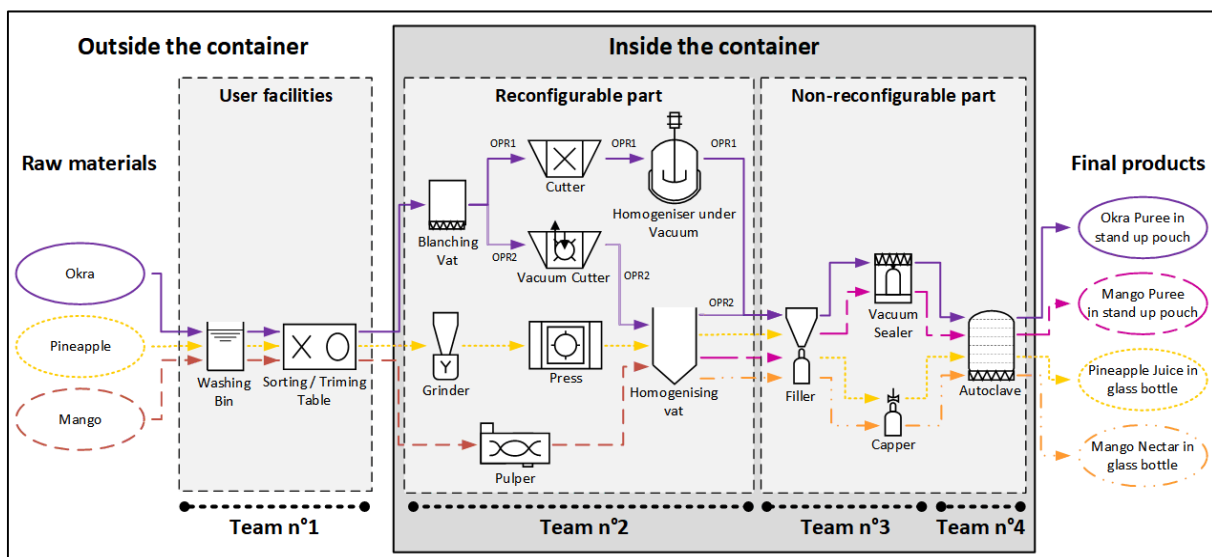


Figure 26 : Equipment structure – flowsheet and assigned work teams. Two Okra Purée recipes (OPR) are possible: OPR1 (solid line) and OPR2 (double solid line).

La MPU doit être assemblée à Abidjan à partir d'équipements importés ou achetés localement. Elle doit pouvoir être configurée (ajout/suppression d'équipements et/ou modification des connexions entre eux) en fonction des besoins spécifiques de chaque utilisateur (matière première à transformer, type de produits finis et conditionnement désiré). La MPU est utilisée 4 mois par an (Mars - Juin) dans le nord de la Côte d'Ivoire pour transformer la mangue en purée puis en nectar. Puis, la MPU est utilisée pendant 4 mois (Août – Novembre) dans le centre de la Côte d'Ivoire pour produire de la purée de gombo puis du jus d'ananas. Entre deux utilisateurs, la MPU est déplacée dans le centre du pays pour que sa maintenance et sa reconfiguration soient effectuées. Chaque utilisateur loue la machine selon un forfait mensuel qui prend en compte i) le coût d'investissement (achat, importation et assemblage) de la MPU par une entreprise dédiée, ii) le coût du transport jusqu'au site de l'utilisateur et iii) les frais de maintenance et de reconfiguration.

La MPU a vocation à être branchée et utilisée dans des zones enclavées où les infrastructures nécessaires à son fonctionnement (réseau public d'eau et d'électricité) sont absentes et/ou de mauvaise qualité (coupures fréquentes). Afin d'éviter que les coupures n'entraînent des interruptions de production :

- Des bouteilles de butane seront la source d'énergie des équipements qui nécessitent des puissances importantes (cuve de blanchiment et autoclave) ;
- Un générateur électrique sera installé pour alimenter les autres équipements pendant les coupures d'électricité ;
- Des réservoirs d'eau seront utilisés pour pallier les intermittences du réseau public et/ou du forage de l'utilisateur.

Les conditions pour que la MPU puisse être installée sur le site de production d'un utilisateur sont les suivantes :

- Disposer d'un espace suffisant pour installer l'unité mobile (container de 40 pieds),
- Disposer d'infrastructures pour réceptionner, stocker, trier, laver et parer les matières premières puis pour étiqueter et stocker les produits finis.
- Être installé dans une zone où pendant la période de récolte, il est possible de collecter entre 2 et 6 tonnes de matière première par jour, dans un rayon de 30 km autour,
- Être en capacité de vendre sans difficulté de petits volumes (< 2 tonnes/jour) de produits finis sur le marché local (Abidjan),
- Disposer d'opérateurs formés au pilotage de l'unité et à la gestion de production.

La production est organisée en séries de campagnes mono produit de 2 mois à raison de 6 jours de production par semaine et de 2 rotations de 8 h par jour. Un nettoyage est effectué entre chaque rotation. La politique de stockage est de type Zero-Wait (Barbosa-Póvoa, 2007). Pendant chaque rotation, les différentes tâches sont réparties entre 4 équipes de travail (cf. Figure 26) :

- Equipe n°1 : Lavage, tri et parage des matières premières,
- Equipe n°2 : Extraction et homogénéisation des produits,
- Equipe n°3 : Conditionnement des produits finis (1 seul opérateur),
- Equipe n°4 : Traitement thermique des produits finis (1 seul opérateur).

2.1.2. Objectifs de conception et indicateurs de performance associés

Le Tableau 18 présente les 5 objectifs de conceptions ainsi que les 12 fonctions de service et les 14 indicateurs de performance associés. Les méthodes utilisées pour calculer ces indicateurs pour chacun des quatre produits finis (soit un total de 56 indicateurs par solution) sont synthétisées dans le Tableau 19.

Tableau 18 : Service functions and performance indicators associated with the 5 design objectives. The priority ranks and weights of the objectives reflect their relative importance to users (cf. part 2.3.2).

Objective priority rank	Design objective	Service function	Performance indicator :		Objective weight w_o (%)
			Name	Abbreviation	
1	Economic viability	To require a limited amount of money (i.e. consistent with the user's financial capacities) to be exploited to its full potential	Monthly operating costs	MOC	41.7
		To be profitable for the user	Monthly operating profit	MOP	
			Return on investment	ROI	
2	Quality of final products	To guarantee food safety	Pasteurization value (for mango and pineapple)	P_0	35.3
			Sterilization value (for okra)	F_0	
		To guarantee organoleptic and nutritional quality	Average quality remaining in the final product	\bar{Q}_f	
			Time to prepare one lot of product	t_{prep}	
3	Operability in landlocked areas	To be operable despite power cuts and/or in the absence of public electricity	Total electrical power required	P_{elec}	10.0
		To consume a daily amount of gas that meets the local supply possibilities	Quantity of gas consumed per shift	$Q_{gas/8h}$	
		To be operable despite water cut-off / in the absence of public water supply	Quantity of water consumed per shift	$V_{water/8h}$	
4	Ergonomics	To have a production flow that is as continuous as possible (no accumulation of in-process products inside the container)	Maximum quantity of work-in-process products per shift	$Q_{maxWIP/8h}$	7.1
		To have enough space in the container for the operators to work safely and productively	Floor space required for equipments, operators and work-in-process products inside the container	S_{floor}	
5	Efficiency of utility use	To use electricity efficiently	Efficiency of electricity consumption	η_{elec}	5.9
		To use gas efficiently	Efficiency of gas consumption	η_{gas}	
		To use water efficiently	Efficiency of water consumption	η_{water}	

Chapitre 6: Multi-scale and multi-objective integrated design of batch food processing plants. Part 2: Application to a mobile fruit and vegetable processing unit

Tableau 19 : Summary of methods used to calculate the 14 performance indicators (the models are detailed in part 2.2.2 and in the appendices n°1) and threshold values used to set the desirability functions associated with each one (cf. part 2.3.1).

Performance indicator		Unit	Calculation method	Threshold values used to set desirability functions (eq. 11)		
				Threshold definition method	Lower desirability threshold (Y_k^-)	Higher desirability threshold (Y_k^+)
MOC		€ / month	Sum of the monthly costs of raw materials, packaging, utilities, labor and rent of the mobile unit	Interviews with the local semi-industrial producers in demand for the MPU	50,000	15,000
MOP		€ / month	Monthly operating revenue minus monthly operating costs		1,000	5,000
ROI		%	Monthly operating profit divided by monthly operating cost		3	15
P_0/F_0		min	Bigelow's method ($z = 10^\circ\text{C}$, $T_{ref} = 70^\circ\text{C}$ for pasteurization and 121.1°C for sterilization) applied to the coldest point of the product (based on simulated temperatures)	Common good industrial practices	cf table 22	
\bar{Q}_f	Texture loss (okra purée)	%	Average value calculated by integrating in the volume of the packaged product the variations of the quality indicators estimated with kinetic models available in the literature	Assumptions made on the basis of acceptability test conducted with African consumers	20	50
	Carotenoid loss (mango products)			Experimental values from Godoy & Rodriguez-Amaya (2007)	36	94
	Total Color Difference (pineapple juice)	-		Perception thresholds of the TCD defined by Pathare <i>et al.</i> , (2013)	3	1.5
t_{prep}	Okra purée	min	Time between the beginning of the trimming of a lot of product and the beginning of its thermal treatment	Common good industrial practices	90	30
	Mango and pineapple products				120	60
P_{elec}		kW	Sum of the electrical powers required by the equipments of the MPU	Maximum and minimum powers at which it is possible to connect to the local electrical network without additional costs.	12	3
$Q_{gas/8h}$		Kg / 8h shift	Sum of the gas consumptions of the unit operations during an 8 hours shift	Assumption that users have the logistical capacity to supply themselves with up to 5 gas cylinders (12.5 kg of butane/cylinder) per 8-hour shift.	60	12
$V_{water/8h}$		m ³ / 8h shift	Sum of the water consumptions of the unit operations during an 8 hours shift	Assumption that users have the capacity to store between 2 and 6m ³ of water in tanks	6	2
$Q_{maxWIP/8h}$		kg	Maximum quantity of work-in-process products inside the container during a 8h shift	Assumption that the available surface inside the container to store the transfer tanks, containing the work-in-process products, should not exceed 4m ² (\approx 18 transfer tanks of 28 kg)	500	100
S_{floor}		m ²	Sum of floor spaces needed for (i) equipments (ii) operators (2 m ² for each) and (iii) transfer tanks containing work-in-process products (0.23 m ² /tank)	Assumption that the total floor space required should occupy 50 to 100% of the surface of a 40 ft. container	27	13
η_{elec}		kWh / kg	Utility consumptions by mass of final product per 8 hours shift	Assumptions made from interviews with local processors	0.30	0.05
η_{gas}		kg / kg			0.15	0.05
η_{water}		L / kg			40	15

2.1.2.1. Viabilité économique

La viabilité économique de la MPU est l'objectif de conception le plus important. Les trois indicateurs de performance associés doivent permettre de rechercher un compromis entre la maximisation de la rentabilité de la MPU d'une part, et la minimisation des montants à investir pour la louer et l'opérer d'autre part. En effet, le faible accès aux financements des industriels locaux est une contrainte majeure qui les oblige à financer leur développement et leur croissance avec leurs fonds propres. C'est pour cette raison qu'aucun objectif de capacité de production n'a été fixé : le problème de conception consistait à rechercher une solution ayant une capacité (i) suffisamment faible pour que les charges d'exploitation mensuelles (*MOC*) soient cohérentes avec les capacités financières limitées des utilisateurs potentiels mais (ii) suffisamment élevée pour générer un résultat d'exploitation mensuel (*MOP*) positif et être rentable (*ROI*).

2.1.2.2. Qualité des produits finis

Les trois indicateurs de performance qui sont associés à l'objectif de qualité des produits finis (deuxième objectif le plus important) doivent permettre de trouver une solution capable de maximiser tous les aspects de la qualité des produits finis.

Au stade de la conception, il est difficile de connaître exactement les valeurs pasteurisatrices ou stérilisatrices (F_0 ou P_0) qui devront être atteintes pour chaque produit fini, pour que la qualité sanitaire soit garantie. Comme ces valeurs peuvent avoir un impact fort sur certaines performances de la MPU (e.g. qualité organoleptique et nutritionnelle des produits finis, capacité de la MPU, etc.), elles sont à la fois définies comme variable de conception (cf. partie 2.1.3) et comme indicateur de performance.

L'apparence, la texture et la teneur en nutriments sont trois types d'indicateurs de qualité sensorielle et nutritionnelle qui peuvent évoluer au cours du traitement thermique (Ling *et al.*, 2015). Aussi, la qualité finale restante (\overline{Q}_f) dans les produits finis de la MPU est quantifiée par:

- Le filant des purées de gombo : cet indicateur est adapté pour prédire leur niveau de gluant (principal critère de qualité des sauces gombo pour les consommateurs africains ; Savouré *et al.*, 2020, 2021).
- Les caroténoïdes contenus dans les produits à base de mangue : ils contribuent à leur couleur et leur qualité nutritionnelle (Vásquez-Caicedo *et al.*, 2007).
- La différence totale de couleur (TCD aussi notée ΔE) du jus d'ananas : cet indicateur permet de mesurer la différence de couleur causée par le brunissement non enzymatique et la destruction des pigments du jus d'ananas (Chutintrasri & Noomhorm, 2007; Rattanathanalerk *et al.*, 2005) qui est perçue par le consommateur (Pathare *et al.*, 2013).

Enfin, pour limiter les phénomènes d'oxydation et de fermentation et préserver au maximum la qualité des produits finis, le temps nécessaire (t_{prep}) pour préparer un lot de produit (*i.e.* quantité de produit contenue dans l'autoclave de la solution), avant qu'il ne soit stabilisé, doit être minimisé.

2.1.2.3. Opérabilité dans les zones enclavées

Pour que la MPU puisse fonctionner malgré l'enclavement des zones d'utilisation, il est nécessaire que :

- La puissance électrique totale installée des équipements de la MPU (P_{elec}) soit suffisamment faible pour que le raccordement de la MPU au réseau électrique public (et à un générateur) soit facile et sans surcoûts,
- La quantité de gaz consommé par rotation ($Q_{gas/8h}$) soit compatible avec les capacités d'approvisionnement des utilisateurs,
- Le volume d'eau consommé par rotation ($V_{water/8h}$) soit compatible avec les capacités de stockage d'eau des utilisateurs.

2.1.2.4. Ergonomie d'utilisation

La containerisation de la ligne de transformation contraint fortement l'espace disponible pour les opérateurs. Cette contrainte est renforcée par le fait que la production est discontinue et que les transferts entre les opérations unitaires se font manuellement, à l'aide de cuves de transferts. Aussi, pour limiter l'encombrement de la MPU, la quantité de produits intermédiaires qui est stockée sur la ligne de production ($Q_{maxWIP/8h}$) doit être limitée. De plus, pour que les opérateurs puissent travailler de façon efficace et sécurisée, l'espace au sol (S_{floor}) nécessaire pour les équipements, les opérateurs et les produits intermédiaires en transfert doit être compatible avec la surface au sol d'un container 40 pieds.

2.1.2.5. Utilisation efficiente des utilités

Dans les zones enclavées, comme l'accès aux utilités nécessaires pour faire fonctionner la MPU est limité, elles doivent être consommées de façon efficiente. Aussi, trois indicateurs (η_{elec} , η_{gas} et η_{water}) ont donc été choisis pour calculer les quantités d'électricité, de gaz et d'eau qui sont nécessaires pour obtenir 1 kg de produit fini.

2.1.3. Variables de conception

Le Tableau 20 présente les 19 variables de conception qui ont été prises en compte et les modalités possibles pour chacune d'entre elles. Pour les définir, une approche de conception intégrée a été retenue afin de prendre en compte les interactions entre la structure de la MPU (nombre et modèle de chaque équipement) et ses conditions d'exploitation (format de l'emballage, conditions opératoires de la stabilisation thermique et nombre d'opérateur dans les équipes n°1 et n°2). En effet, pour chacun des 4 produits finis, les conditions d'exploitation pouvaient avoir un effet sur les performances de l'atelier (e.g. capacité de production, qualité des produits finis) et donc sur la décision de conception.

Pour chaque famille d'équipement (i.e. équipements permettant de réaliser la/les mêmes opérations unitaires), les modèles possibles (i.e. parmi lesquels l'algorithme effectue une sélection) correspondent à des équipements réels dont les caractéristiques (fonctions disponibles, capacité, dimensions, poids, contrôle commandes, prix etc.) ont été collectées auprès de différents équipementiers européens (cf Annexe n°1). Les modèles possibles ont été déterminés en tenant compte de leur adéquation avec les contraintes imposées par le scénario d'utilisation. Le cahier des charges était le suivant :

- Présenter des caractéristiques (prix, capacités et fonctions) variées.
- Avoir une capacité adaptée à des débits de lignes compris entre 100 et 500 kg/h.

- Avoir des dimensions compatibles avec la conteneurisation (pour cette raison, les équipements compacts, verticaux et polyvalents étaient préférés).
- Avoir un coût modéré.
- Etre préférentiellement équipé d'un système de contrôle-commande électromécanique (plutôt qu'électronique et/ou numérique) et ne pas comporter de pièces fragiles afin de respecter les contraintes de réparabilité/maintenance locale et de robustesse.
- Fonctionner avec du gaz pour les autoclaves et les blancheurs.

Tableau 20 : General overview of the different design variables and of the possible modalities/values for each of them

Type of design variable	Abbreviation	Design variables		Possible modalities / values
Equipment variables ¹	e_{blanch}	Model of blanching Vat		7 models ³
	e_{cutt}	Model of cutter		7 models ³
	e_{grind}	Model of grinder		8 models ³
	e_{press}	Model of press		3 models ³
	e_{pulp}	Model of pulper		7 models ³
	e_{homo}	Model of homogenizer		8 models ³
	e_{fill}	Model of filler		12 models ³
	e_{vac}	Model of vacuum sealer		2 models ³
	e_{auto}	Model of autoclave		13 models ³
	N_{blanch}	Number of blanching vats		1, 2, 3 or 4
	N_{cutt}	Number of cutters		0 or 1
	N_{homo}	Number of homogenizers		1, 2 or 3
	N_{auto}	Number of autoclaves		1 or 2
	N_{capp}	Number of screw cappers		0 or 1
Product variables ²	V_{pack}^p	Packaging volume	of Okra and Mango purees (stand up pouches)	500 or 1000 g
			of Pineapple juice and Mango nectar (glass bottles)	330 or 1000 ml
Operating conditions ²	T_{hold}^p	Temperature	of Pasteurization (fruit products)	80, 85 or 90°C
			of Sterilization (vegetable products)	115, 120 or 125°C
	P_0^p or F_0^p	Pasteurization value (P_0 ; fruit products) or Sterilization value (F_0 ; vegetable products)		50, 75 or 100 min 5, 6 or 7 min
Production resources variables ²	N_{OpT1}^p	Number of operators in Team n°1 (washing, sorting and trimming)		3, 4, 5 or 6
	N_{OpT2}^p	Number of operators in Team n°2 (extraction and homogenization)		2, 3, 4 or 5
¹ : Design variables common to all 4 final products				
² : Design variables that are specific to each product p				
³ : see Tables A.1 to A.22 in Appendix n°1) for details				

Le problème de conception consistait à déterminer quels étaient la structure d'atelier de la MPU (nombre et le modèle de chaque équipement à installer) et les conditions d'exploitation de chaque produit fini (volume de l'emballage, conditions opératoires du traitement thermique et nombre d'opérateur dans les équipes n°1 et 2) qui permettaient de satisfaire au mieux les objectifs de conception.

Le nombre d'équipements des familles « grinder », « press », « pulper », « filler », « vacuum sealer » et « crown capper) était fixé à 1. Pour d'autres familles d'équipement (blanching vats, homogenizers, autoclaves), le nombre a été intégré comme variable de conception afin de traduire le fait qu'une solution comprenant plusieurs équipements de petite capacité, utilisés en parallèle, pouvait être plus performante qu'une solution comprenant un seul modèle de grande capacité. Pour les familles d'équipements « cutters » et « screw capper », le nombre d'unités pouvait être nul des modèles (e.g. « grinder-cutter ») appartenant à d'autres familles (e.g. grinder) pouvaient remplir la même fonction (e.g. cutting).

2.2. Développement d'un outil de simulation multi-échelle de la MPU

2.2.1. Architecture de l'outil de simulation

2.2.1.1. Décomposition hiérarchique du système MPU

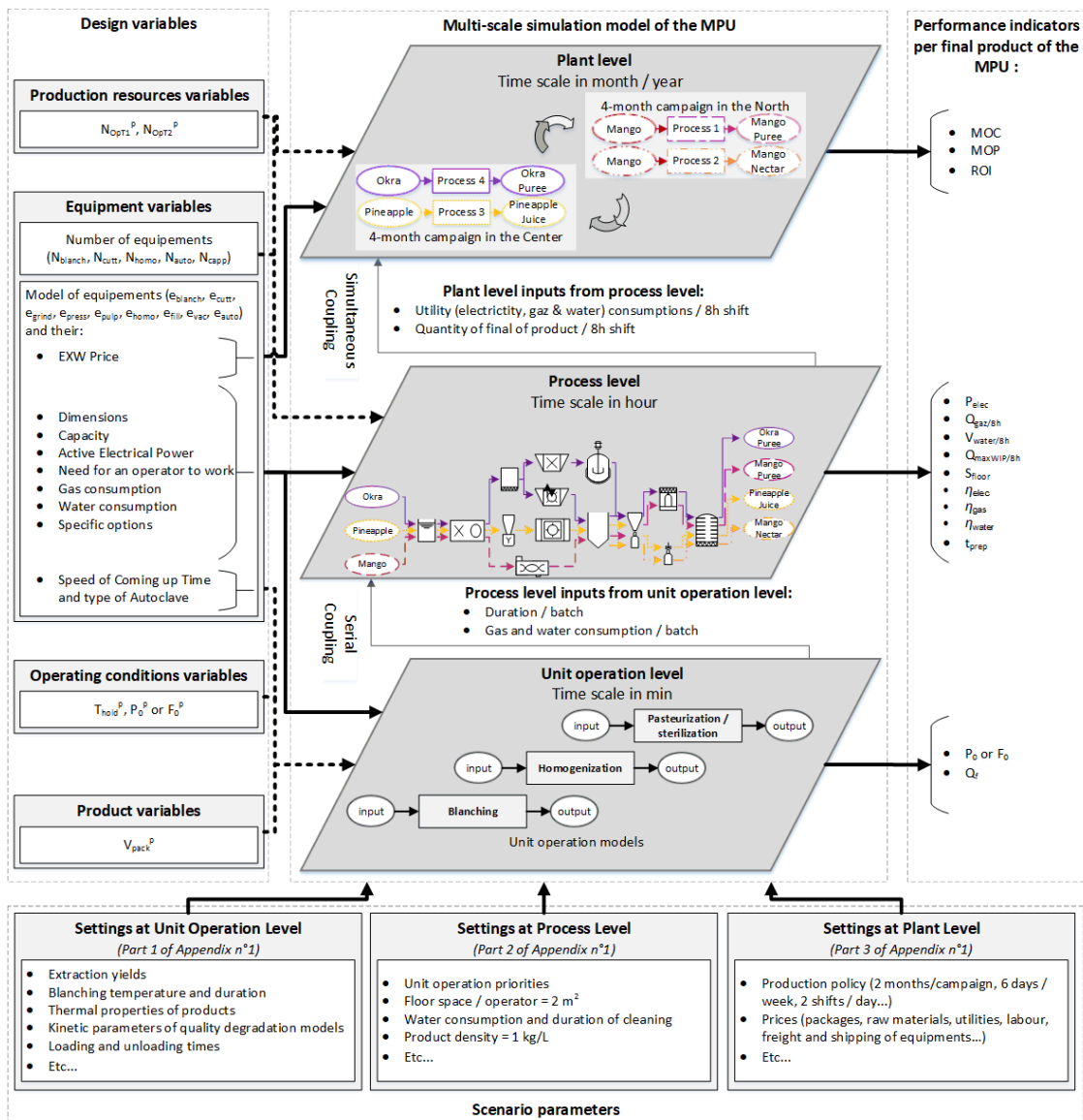


Figure 27 : Architecture of the multi-scale simulator of the MPU, information flows between the different levels and bridging methods used.

La MPU a été représentée comme un système composé de trois niveaux fonctionnels (Figure 27) :

- Au niveau supérieur (atelier), le système MPU regroupe les éléments qui permettent de déplacer la MPU et les sous-systèmes permettant de produire les 4 produits finis. A ce niveau, les flux logistiques et économiques de la MPU sont comptabilisés pour évaluer ses performances économiques.
- Au niveau intermédiaire (procédé), le processus de transformation d'une matière première en un produit fini est modélisé. Comme les recettes, les opérations unitaires, les équipements et les emballages sont spécifiques à chaque produit fini (Figure 26), un sous-système a été associé à chacun d'eux. Pour chaque produit fini, l'objectif de la modélisation est d'évaluer les performances du procédé de transformation (quantités consommées, quantités produites, durées) tout en tenant compte des ressources qu'il mobilise (équipements et opérateurs) et consomme (utilités, matières premières, emballages).
- Au niveau inférieur, un sous-système a été associé à chaque opération unitaire (UO). A ce niveau, la modélisation permet d'estimer les performances d'une opération unitaire (rendement, temps opératoire, qualité du produit fini, ressources nécessaires) en fonction des variables de conception (caractéristiques de l'équipement utilisé, volume d'emballage et/ou conditions opératoires).

2.2.1.2. Echelles de temps caractéristiques de chaque niveau fonctionnel

Une échelle de temps caractéristique a été associée à chaque niveau fonctionnel :

- Au niveau de l'atelier, le mois est l'échelle de temps adaptée pour comptabiliser les flux financiers liés à l'utilisation de la MPU (paiement des opérateurs et des utilités, vente de produits finis, etc...). Cette échelle correspond également à la durée pendant laquelle la MPU peut être louée.
- A l'échelle du procédé, la rotation de 8 h est l'échelle de temps adaptée car elle correspond au temps de travail d'une équipe d'opérateurs.
- Au niveau de l'opération unitaire, la minute est l'échelle de temps caractéristique qui est adaptée pour caractériser le temps opératoire d'une UO et pour modéliser les transformations physico-chimiques, microbiologiques et organoleptiques de l'aliment pendant une UO.

2.2.1.3. Nature des flux d'informations et méthodes de couplage utilisés

Les flux d'informations entre les différents niveaux hiérarchiques du modèle de simulation sont représentés sur la Figure 27. La nature des interactions et des flux d'information entre les niveaux hiérarchiques est de type « multi-fonctional-dependent » (Panchal *et al.*, 2005) : des variables de conception et des indicateurs de performance sont associés à chaque niveau hiérarchique et le flux d'information entre les niveaux est unidirectionnel (du niveau inférieur vers le niveau supérieur). Comme indiqué sur la Figure 27, deux méthodes de couplage vertical ont été combinées :

- Un couplage en série unidirectionnel (Ingram *et al.*, 2004) a été utilisé pour coupler les échelles opération unitaire et procédé. Dans un premier temps, les modèles représentant les opérations unitaires ont été résolus de façon indépendantes puis leurs résultats étaient stockés dans des bases de données. Dans un second temps, ces résultats étaient utilisés dans les modèles du niveau procédé.

- Un couplage simultané (Ingram et al., 2004) a été utilisé pour coupler les échelles procédé et atelier. Les modèles de ces deux niveaux ont été implémentés et résolus ensemble. Pour cela, certaines informations générées par le modèle procédé (quantités produites et utilités consommées) étaient converties en grandeurs économiques pour calculer les performances du niveau atelier.

2.2.2. Modélisation des trois niveaux fonctionnels

2.2.2.1. Modèles utilisés au niveau de l'opération unitaire

Un travail important a été conduit pour élaborer les modèles prédictifs simples permettant de calculer les performances (rendement ; durée opératoire ; qualité du produit fini ; ressources immobilisées et/ou consommées) de chaque UO par batch de produit traité, en fonction des caractéristiques techniques des modèles d'équipements possibles (capacité, débit, utilités nécessaires/consommées) et/ou des autres variables de conception (format de l'emballage et conditions opératoires de la stabilisation thermique) et/ou du produit fini. Pour chaque UO, les caractéristiques de tous les équipements ainsi que les modèles et les hypothèses de calcul qui ont été utilisées sont détaillés en annexes (partie 1. de l'Annexe n°1).

Comme la stabilisation thermique (pasteurisation ou stérilisation) conditionne la qualité (sanitaire, organoleptique et nutritionnelle) des produits finis et constitue le goulot d'étranglement des recettes, un modèle prédictif plus complexe a été utilisé pour représenter cette UO (voir le modèle complet en partie 1.12.2 de l'Annexe n°1). L'objectif du modèle était de déterminer la durée d'un cycle dans l'autoclave (t_{stab}) ainsi que la qualité moyenne restante dans chaque produit fini à la fin du traitement thermique ($\overline{Q_f}$), en fonction du modèle d'autoclave, du format de l'emballage, des conditions opératoires de la stabilisation thermique.

Pour cela, les transferts thermiques entre le milieu chauffant et l'intérieur du produit fini étaient modélisés en tenant compte de la géométrie et du volume de l'emballage, des propriétés thermiques des produits finis et de l'emballage, de la température du traitement thermique (T_{hold}^p) et des caractéristiques des autoclaves (type d'autoclave et vitesse de montée en température).

Tableau 21 : Kinetic models and Arrhenius parameters used to model the degradation of the organoleptic and/or nutritional quality of final products during pasteurization or sterilization.

Product	Okra puree	Mango puree and nectar	Pineapple juice
Quality indicator	Stringiness	Carotenoid content	ΔE (CIE Lab color space)
Kinetic model order	1		0
Kinetic equation	$\frac{\partial q}{\partial t} = -k \cdot q$		$\frac{\partial q}{\partial t} = k$
Ea (kJ·mol ⁻¹)*	128	20	47
Tref (°C)	100	70	70
kTref*	4.98 10 ⁻³ min ⁻¹	3.89 10 ⁻³ min ⁻¹	6.97 10 ⁻³ mol.L ⁻¹ .s ⁻¹
Reference	Chapitre 4	Ahmed et al. (2002)	Rattanathanalerk et al. (2005)
* : Arrhenius model			

A partir des températures qui étaient prédites par le modèle, la formule de Bigelow permettait de calculer P_0 ($z = 10^\circ\text{C}$, température de référence = 70°C) ou F_0 ($z = 10^\circ\text{C}$, température de référence = 121.1°C) à cœur. Pour chaque produit fini, la qualité finale restante dans le produit

était évaluée en tout point en utilisant les modèles cinétiques disponibles dans la littérature (cf. tableau 21). Elle était ensuite intégrée sur l'ensemble du volume pour calculer $\overline{Q_f}$.

2.2.2.2. Modèles utilisés au niveau du procédé

Une recette est la séquence d'opérations unitaires qui permet d'obtenir un produit fini donné avec une combinaison d'équipements et dans des conditions opératoires données. En fonction des familles et/ou des types d'équipements contenus dans la solution de conception, les recettes permettant d'obtenir certains produits finis pouvaient légèrement varier ou ne pas être faisable (cf. Figure 26). Par conséquent, à partir de la liste d'équipements contenus dans la solution de conception, la première étape du simulateur du procédé était de déterminer si une recette était faisable pour chacun des 4 produits finis. Si c'était le cas, la recette possible (*i.e.* la séquence d'opérations unitaires et la combinaison des e_i^p équipements associés) était déterminée pour chaque produit p . Enfin, pour chaque solution de conception faisable, le simulateur d'évènement discrets (DES) simulait l'exécution de chacune des 4 recettes au cours d'une rotation de 8h (cf. partie 2 de l'Annexe n°1 pour une description complète du DES).

Au niveau du procédé, pour chaque produit p , le simulateur permettait d'estimer la capacité de production de la MPU ($Q_{prod/8h}^p$) ainsi que 8 indicateurs de performance. Les indicateurs associés aux objectifs « Opérabilité dans les zones enclavées » et « Utilisation efficiente des utilités » (cf. Tableau 19) étaient calculés de façon classique (cf. part 2.3 de l'Annexe n°1). Les indicateurs t_{prep}^p et Q_{maxWIP}^p étaient estimés grâce aux équations suivantes :

$$t_{prep}^p = t_{trim}(l_1^p) - t_{stab}(l_1^p) \quad (eq. 8)$$

$$Q_{maxWIP}^p = \max_{0 \leq t \leq 8h} \sum_{j=trim}^{j=stab} QWIP_j^p(t) \quad (eq. 9)$$

Avec :

- $t_{trim}(l_1^p)$: La date de déclenchement (en min) de l'opération de parage pour le premier lot (quantité de produit contenue dans l'autoclave de la solution) de la rotation,
- $t_{stab}(l_1^p)$: La date de déclenchement (en min) de l'opération de stabilisation thermique pour le premier lot de la rotation,
- $QWIP_j^p(t)$: La quantité (kg) de matière en transfert dans chaque zone j séparant les opérations unitaires effectuées dans le container, à chaque instant t .

Le calcul de la surface au sol nécessaire dans le container pour produire un produit p tenait compte de la surface au sol occupée par (i) les e_i^p équipements de la configuration, (ii) les opérateurs travaillant dans le container ($2 \text{ m}^2 / \text{opérateur}$) et (iii) les masses en cours stockées et/ou transférées dans des bacs de transfert ($\emptyset = 0.48 \text{ m}$; capacité utile = 28 kg ; surface au sol = $0,23 \text{ m}^2$; cf. partie 1.3 de l'Annexe n°1). Elle était calculée selon la formule suivante :

$$S_{floor}^p = (N_{OpT2}^p + N_{OpT3}^p + N_{OpT4}^p) \times 2 + \frac{Q_{maxWIP}^p}{28} \times 0.23 + \sum S_{floor}(e_i^p) \quad (eq. 10)$$

Avec :

- N_{OpT2}^p , N_{OpT3}^p et N_{OpT4}^p : le nombre d'opérateurs des équipes n°2, 3 et 4 (qui opèrent dans le container) pour produire le produit p ,
- $S_{floor}(e_i^p)$: la surface au sol de l'équipement e_i^p utilisé pour produire le produit p .

2.2.2.3. Modèles utilisés au niveau de l'atelier

Au niveau de l'atelier, la modélisation prenait en compte le fait que la mobilité est une fonction partagée entre les 4 sous-systèmes qui composent la MPU. Une étude en amont a permis de d'identifier les éléments (container, semi-remorque et système de levage) les plus pertinents pour la mobilité. La solution de conception était considérée comme infaisable si l'encombrement et/ou le poids des équipements n'était pas compatible avec les dimensions du container et/ou avec la capacité du système de levage (cf. partie 3.3.2 de l'Annexe n°1).

Les hypothèses et les modèles utilisées pour calculer les trois indicateurs associés à l'objectif « viabilité économique » (cf. Tableau 19) sont présentés en détails dans l'Annexe n°1. A noter que pour calculer le coût de location mensuel de la MPU, les coûts fixes (coûts des équipements, des éléments de mobilité, de l'assemblage et de la maintenance) étaient répartis entre les 4 produits finis. De plus, comme la MPU était vouée à produire 2 produits finis différents par zone d'installation, pour calculer son coût de location mensuel, le coût engendré par son transport d'une zone à l'autre était réparti entre 2 produits finis.

2.3. Modélisation des préférences et choix d'une méthode de sélection

2.3.1. Fonctions de désirabilité

Une fonction de désirabilité était associée à chacun des k indicateurs de performance pour traduire dans quelle mesure les fonctions de services auxquels ils étaient associés étaient plus ou moins satisfaites. A l'exception de la valeur pasteurisatrice (ou stérilisatrice), une fonction sigmoïde a été utilisée pour transformer la valeur Y_k^p de tous les indicateurs de performance en Indice de Désirabilité Indicateur (IDI_k^p). Pour chaque indicateur de performance, cette fonction de désirabilité était paramétrée avec les seuils de désirabilité supérieurs (Y_k^+) et inférieurs (Y_k^-) définis dans le Tableau 19. La formule de calcul était la suivante :

$$IDI_k^p = \frac{1}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\tan((IDI_k^+ - 0.5) \cdot \pi) \cdot \frac{Y_k^p - Y_k^m}{Y_k^+ - Y_k^m} \right) + 0.5 \quad (eq. 11)$$

Avec :

- IDI_k^+ : indice de désirabilité correspondant à Y_k^+ (pour tous les indicateurs $IDI_k^+ = 0.9$).
- $Y_k^m = \frac{Y_k^+ + Y_k^-}{2}$: la valeur moyenne de l'indicateur de performance (sa désirabilité est égale à 0,5).

A noter que comme la fonction est symétrique, l'indice de désirabilité correspondant à Y_k^- se calcule comme suit : $IDI_k^- = 1 - IDI_k^+ = 0.1$.

Tableau 22 : Desirability values associated with different possible values of P_0 (or F_0)

	P_0 (min)	F_0 (min)	IDI_{P_0/F_0} values
Possible modalities of P_0/F_0 value	50	5	0.3
	75	6	0.6
	100	7	0.9
Product	Mango Purée, Mango Nectar and Pineapple Juice	Okra purée	

Comme seulement 3 valeurs étaient possibles pour les valeurs pasteurisatrice et stérilisatrice, une fonction discrète a été utilisée pour transformer ces valeurs en indices de désirabilité (cf. Tableau 22).

2.3.2. Méthode de sélection

Pour rechercher et sélectionner les meilleures solutions dans l'espace de conception, deux méthodes différentes ont été utilisées pour agréger les 56 indices de désirabilités calculés pour chaque solution de conception.

Dans un premier temps, une fonction d'agrégation minimale a été utilisée avec l'algorithme génétique pour rechercher et sélectionner l'ensemble \mathcal{P} des « solutions les moins mauvaises » dans l'espace de conception. Dans un contexte de conception, cette fonction correspond à un principe de précaution car elle ne tient pas compte des préférences du décideur pour les différents objectifs de conception (Madoumier et al., 2019; Scott & Antonsson, 1998). Ainsi, pour chaque solution de conception, 4 Product Desirability Index (PDI_{GA}^p) étaient utilisés par l'algorithme génétique pendant l'optimisation (cf. *infra*). La valeur de chaque PDI_{GA}^p correspondait à la valeur minimale des 14 IDI_k^p calculés pour ce produit p :

$$PDI_{GA}^p = \min_{1 \leq k \leq 14} IDI_k^p \text{ (eq. 12)}$$

Dans un second temps, après la phase de recherche, une méthode d'agrégation pondérée a été utilisée pour classer les solutions de l'ensemble \mathcal{P} et identifier la meilleure d'entre elles. Pour cela, afin de tenir compte de l'importance relative des 5 objectifs et des 4 produits finis pour les utilisateurs, 3 agrégations successives ont permis de calculer un Global Desirability Index (GDI_{AHP}^p), à partir des IDI_k^p d'une solution de conception.

Pour chacun des 4 produits p , une première agrégation consistait à calculer un Objective Desirability Index (ODI_o^p) pour chacun des 5 objectifs de conception. Pour cela, les n IDI_{ko}^p associés à l'objectif o étaient agrégés ensemble grâce à l'agrégation minimale comme suit :

$$ODI_o^p = \min_{1 \leq o \leq n} IDI_{ko}^p \text{ (eq. 13)}$$

L'objectif de la seconde agrégation était d'agréger les 5 ODI_o^p par produit en tenant compte des préférences du décideur et des utilisateurs pour les différents objectifs. Ainsi, pour chacun des 4 produits finis, le PDI_{AHP}^p était calculé en faisant la moyenne géométrique pondérée des 5 ODI_o^p (eq. 14). A noter que pour estimer le poids relatif (w_o) des 5 objectifs (Tableau 18), la méthode AHP a été utilisée après avoir priorisé les objectifs par ordre d'importance avec la méthode FMECA.

$$PDI_{AHP}^p = \prod_{o=1}^5 ((ODI_o^p)^{w_o})^{1/\sum_{o=1}^5 w_o} \text{ (eq. 14)}$$

Enfin, une troisième agrégation par solution de conception permettait d'obtenir le GDI_{AHP} en faisant la moyenne géométrique pondérée des 4 PDI_{AHP}^p . Le fait que la durée annuelle d'utilisation de la MPU pour chacun des 4 produits finis soit identique justifie que le poids attribué aux 4 produits ait été identique ($w_p = 0.25$) :

$$GDI_{AHP} = \prod_{p=1}^4 ((PDI_{AHP}^p)^{w_p})^{1/\sum_{p=1}^4 w_p} \text{ (eq. 15)}$$

2.4. Méthode d'optimisation

La procédure d'optimisation a été conduite en deux temps. Pendant la première phase, un « Non-dominated Sorting Genetic Algorithm » de type II (NSGA-II ; Deb *et al.*, 2000) a été utilisé pour rechercher un ensemble de solutions non dominées. Le NSGA-II devait maximiser les 4 PDI_{GA}^p obtenus avec la méthode d'agrégation minimale. L'algorithme suivait la procédure standard utilisée dans les algorithmes génétiques. Après avoir généré aléatoirement une population de 10 000 solutions, pendant 75 générations, l'algorithme sélectionnait les meilleurs individus de chaque génération en utilisant l'opérateur de sélection NSGA-II, croisait ces individus entre eux (probabilité de 80%) et/ou les faisait muter (probabilité de 70 %). Cette procédure permettait d'obtenir un ensemble \mathcal{L} composé de 10 000 solutions uniques.

Suite à la phase d'optimisation, un ensemble \mathcal{P} contenant 5 639 solutions non-dominées a été extrait de l'ensemble \mathcal{L} en comparant leurs 4 PDI_{GA}^p deux à deux grâce à l'opérateur d'intersection des préférences (noté \blacklozenge). Cet opérateur est un variant moins sélectif de l'opérateur de Pareto (Kießling, 2002). Selon cet opérateur, une solution s' est meilleure qu'une solution s si elle est strictement meilleure que cette dernière pour toutes les préférences q_p (eq. 16). Pour un produit p , une solution était considérée comme meilleure si la valeur du PDI_{GA}^p calculée pour ce produit p était plus élevée. Puisqu'il y avait 4 produits, la notation de l'opérateur de préférence utilisé est la suivante :

$$s <_{q_1 \blacklozenge q_2 \blacklozenge q_3 \blacklozenge q_4} s' \Leftrightarrow s <_{q_1} s' \wedge s <_{q_2} s' \wedge s <_{q_3} s' \wedge s <_{q_4} s' \text{ (eq. 16)}$$

Les 5 639 solutions non dominées de l'ensemble \mathcal{P} ont ensuite été classées les unes par rapport aux autres selon leur GDI_{AHP} (obtenu avec la méthode d'agrégation pondérée). La solution la plus satisfaisante est celle pour laquelle le GDI_{AHP} était le plus élevé. Dans la suite de l'article, le terme « solution obtenue » et la notation s_{res} feront référence à cette solution.

2.5. Outils et logiciels utilisés pour implémenter l'outil d'aide à la conception

Différents outils et logiciels ont été utilisés pour implémenter le modèle de simulation multi-échelle et le modèle d'optimisation multi-objectif.

Un outil de modélisation multiphysique (COMSOL Multiphysics® version 5.5, COMSOL Inc., Stockholm, Suède) a permis d'implémenter et résoudre le modèle décrivant l'opération de stabilisation thermique. La méthode des éléments finis (maillage extra-fin) a été utilisée pour résoudre les équations différentielles. Un couplage avec Matlab et une boucle d'optimisation permettaient d'identifier le temps de maintien en température dans l'autoclave nécessaire pour toutes les combinaisons possibles de produit fini et de variables de conception prises en compte au niveau de l'opération unitaire (modèle d'autoclave, format d'emballage, température de stabilisation et valeur stérilisatrice ou pasteurisatrice cible). Les données générées par ce modèle (durée d'un cycle de stabilisation thermique et qualité restante moyenne dans le produit fini) étaient stockées dans une base de donnée « traitement thermique ». Cette dernière était connectée au reste du simulateur des niveaux procédés et atelier afin d'économiser du temps de calcul pendant l'optimisation avec l'algorithme.

Le langage de programmation Python (version 3.7.4) a été employé pour implémenter (i) le simulateur d'évènement discret du procédé avec la librairie SimPy (Lünsdorf & Scherfke, 2020) et (ii) l'algorithme d'optimisation NSGA-II avec la librairie DEAP (version 1.3; Fortin *et al.*, 2012).

Avec le logiciel R (version 3.5.1 ; R Core Team, 2018), le package rPref (Roocks, 2016) a été permis d'extraire l'ensemble \mathcal{P} (les solutions non-dominées) de l'ensemble \mathcal{L} (la dernière génération obtenues avec le NSGA-II). Puis la visualisation et l'analyse des résultats a été réalisée avec le le package ggplot2 (Wickham, 2016).

3. Visualisation et analyse des solutions de conceptions obtenues

A l'issue du processus d'optimisation, les résultats ont été visualisés et analysés pour valider que :

- i. La solution obtenue satisfait au mieux les préférences utilisateurs/décideur,
- ii. Les performances prédites à chaque niveau fonctionnel pour la solution obtenue sont réalistes dans le contexte du scénario d'utilisation,
- iii. Les décisions de conception correspondant à la solution obtenue sont cohérentes.

Ce faisant, cette étape a permis d'identifier les améliorations possibles de l'outil d'aide à la conception.

3.1. Niveau de satisfaction des solutions obtenues

3.1.1. Comparaison de la satisfaction globale de la solution obtenue avec celle des autres solutions

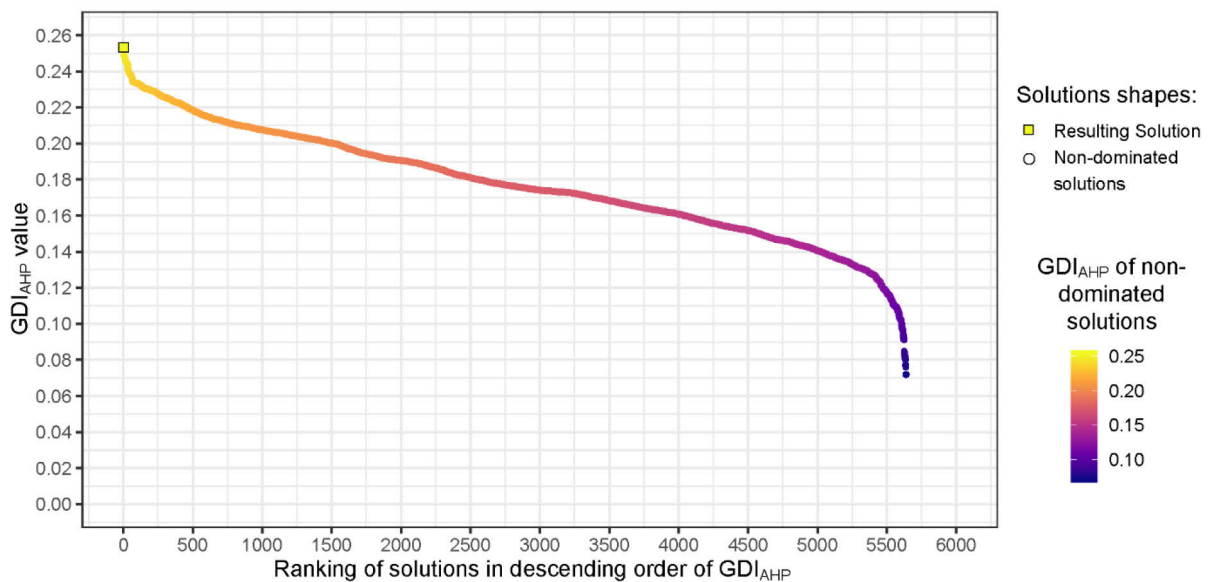


Figure 28 : GDI_{AHP} values of the 5 639 non-dominated solutions of \mathcal{P} as function of their rank. The resulting solution (yellow square) is the one with the highest GDI_{AHP} value (0.253).

L'affichage du classement des 5 639 solutions non-dominées en fonction de leur GDI_{AHP} (Figure 28) permet de visualiser dans quelle mesure la solution obtenue à l'issue de la phase d'optimisation est globalement plus satisfaisante (ou non) que les autres solutions de \mathcal{P} . La chute rapide du GDI_{AHP} des 182 solutions les mieux classées (> 0.23) et l'allure sigmoïdale de la Figure 28 montrent que parmi les 5 639 solutions de \mathcal{P} , seules quelques unes satisfont au mieux les préférences des utilisateurs. Plus précisément, seules 36 solutions ont un $GDI_{AHP} > 0.24$ et seules 3 solutions (dont la solution obtenue) ont un $GDI_{AHP} > 0.25$.

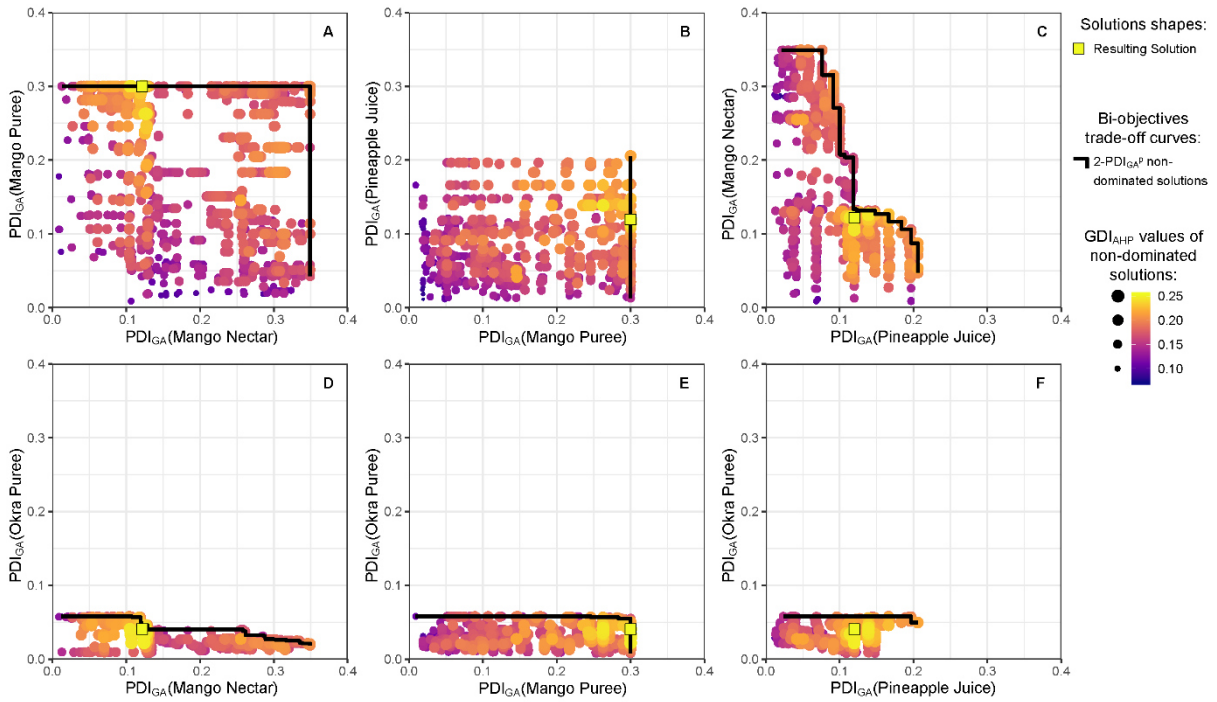


Figure 29 : Bi- PDI_{GA}^P scatter plots of \mathcal{P} , the set of 5 639 non-dominated solutions extracted from \mathcal{L} . For each plot, the black line represent the bi- PDI_{GA}^P (eq. 13) trade-off curve. The colour and size gradient represents the value of each solution GDI_{AHP} (eq. 15). The resulting solution (Yellow Square) is the one with the highest GDI_{AHP} value (0.253).

L'affichage des nuages de points bi- PDI_{GA}^P de \mathcal{P} (Figure 29) facilite la visualisation de l'ensemble des solutions non-dominées générées par le NSGA-II et de comparer leurs PDI_{GA}^P deux à deux. Les courbes de compromis bi- PDI_{GA}^P lient les solutions non-dominées de chaque nuage de points et permettent de visualiser quelles sont les PDI_{GA}^P maximaux pouvant être atteints pour chaque produit fini. La comparaison des 6 nuages de points de la Figure 29 révèle que pendant l'exploration de l'espace de conception, le NSGA-II a trouvé des solutions plus satisfaisantes pour le nectar de mangue ($\max(PDI_{GA}^{MN}) = 0.35$) et la purée de mangue ($\max(PDI_{GA}^{MP}) = 0.3$) que pour le jus d'ananas ($\max(PDI_{GA}^{PJ}) = 0.21$) et la purée de gombo ($\max(PDI_{GA}^{OP}) = 0.06$). Comme la valeur de PDI_{GA}^{OP} est obtenue par agrégation minimale des 14 IDI_k^{OP} , cela signifie que toutes les solutions non-dominées de \mathcal{P} ont au moins une fonction de service qui est très mal satisfaite pour la purée de gombo ($IDI_k^{OP} \leq 0.06$).

Sur la Figure 29, un gradient de taille et de couleur a été affecté aux solutions de \mathcal{P} en fonction de leur GDI_{AHP} . Cela permet de visualiser où se positionnent les solutions qui représentent le meilleur compromis, après que les préférences des utilisateurs pour les objectifs de conception et les produits finis aient été prises en compte avec l'agrégation pondérée. La position de la solution obtenue (qui prend le mieux en compte ces préférences) par rapport aux courbes de compromis bi- PDI_{GA}^P (tracées sans prendre en compte ces préférences) indique dans quelle mesure et pour quels produits finis la prise en compte de ces préférences conduit vers une solution ayant un/des PDI_{GA}^P inférieur(s) à celui d'autres solutions. Ainsi, la Figure 29E montre que s_{res} a un PDI_{GA}^P maximal pour la purée de mangue ($PDI_{GA}^{MP}(s_{res}) = 0.3 / 0.3$) et proche de la valeur maximale possible pour la purée de gombo ($PDI_{GA}^{OP}(s_{res}) = 0.04 / 0.06$). Par contre, pour le nectar de mangue et le jus d'ananas (Figure 29C), les PDI_{GA}^P de s_{res} sont très en deçà des valeurs maximales possibles ($PDI_{GA}^{MN}(s_{res}) = 0.12 / 0.35$;

$PDI_{GA}^{PJ}(s_{res}) = 0.12 / 0.21$). Cela signifie que pour ces 2 produits finis, la prise en compte des préférences des utilisateurs pour les objectifs de conception et les produits finis a conduit à sélectionner une solution qui est moins satisfaisante que possible pour au moins un des 14 indicateurs de performance.

3.1.2. Niveau de satisfaction de la solution obtenue par objectif de conception

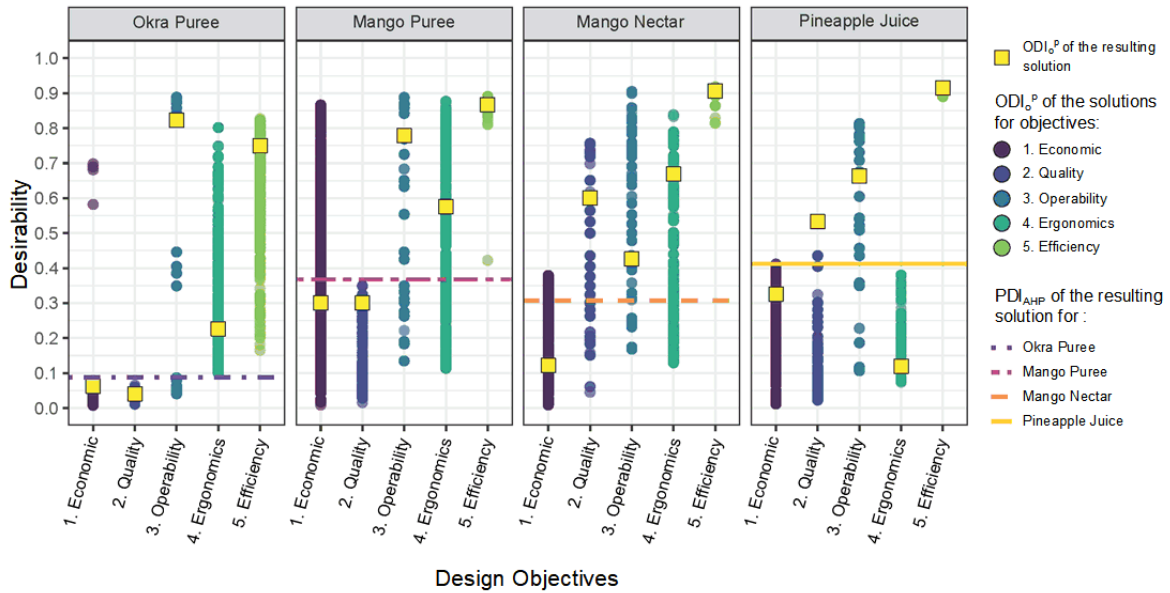


Figure 30 : Objective desirability diagram. Objective desirability Indices (ODI_o^p) calculated per objective o per final product p for the 5 639 solutions of \mathcal{P} (cf. eq. 13). ODI_o^p of the resulting solution are represented by a yellow square. The horizontal lines represent the 4 Product Desirability Index (PDI_{AHP}^p) of the resulting solution calculated from the 5 ODI_o^p of each product p (eq. 14). On the x-axis, the 5 design objectives are ranked in order of importance to the users.

Les ODI_o^p calculés par produit p et par objectif o pour les solutions de \mathcal{P} sont représentés sur la Figure 30. Les lignes horizontales correspondent aux 4 PDI_{AHP}^p de la solution obtenue et permettent d'évaluer dans quelle mesure elle est plus ou moins satisfaisante pour chaque produit fini. Ainsi, alors que s_{res} satisfait très mal les préférences utilisateurs pour la purée de gombo ($PDI_{AHP}^{OP}(s_{res}) \cong 0.09$), elle est plutôt satisfaisante pour les 3 autres produits finis ($0.3 \leq PDI_{AHP}^p(s_{res}) \leq 0.42$).

Sur la Figure 30, les carrés jaunes représentent les ODI_o^p de la solution obtenue et permettent de visualiser quels sont les objectifs qu'elle satisfait plus ou moins bien. Pour chaque produit fini, leur position par rapport à la ligne horizontale indique quels sont les objectifs qui augmentent ou diminuent le PDI_{AHP}^p de s_{res} . Par exemple, pour la purée de gombo, s_{res} satisfait très mal les 2 objectifs les plus importants ($ODI_{Quality}^{OP}(s_{res}) < 0.1$ et $ODI_{Economic}^{OP}(s_{res}) < 0.1$). Cela explique pourquoi s_{res} est peu satisfaisante pour ce produit ($PDI_{AHP}^{OP}(s_{res}) < 0.1$).

Sur la Figure 30, la comparaison des ODI_o^p de la solution obtenue avec les ODI_o^p des autres solutions non-dominées permet d'identifier quels sont les couples produits-objectifs pour lesquels la s_{res} est la plus en deçà des valeurs maximales possibles. Par exemple, pour la purée de mangue, s_{res} est bien moins satisfaisante que possible pour l'objectif « viabilité économique » ($ODI_{Economic}^{MN}(s_{res}) = 0.12 / 0.4$). Pour le jus d'ananas, s_{res} est bien moins

satisfaisante que possible pour l'objectif « Ergonomie d'utilisation » ($ODI_{Ergonomics}^{PJ}(s_{res}) = 0.12 / 0.4$). Cela indique que la solution sélectionnée avec l'agrégation pondérée est moins satisfaisante que possible pour au moins (i) 1/3 indicateurs de performance associés à l'objectif « viabilité économique » pour le nectar de mangue et (ii) 1/2 indicateurs de performance associés à l'objectif « ergonomie d'utilisation » pour le jus d'ananas.

3.1.3. Niveau de satisfaction de la solution obtenue par indicateur de performance

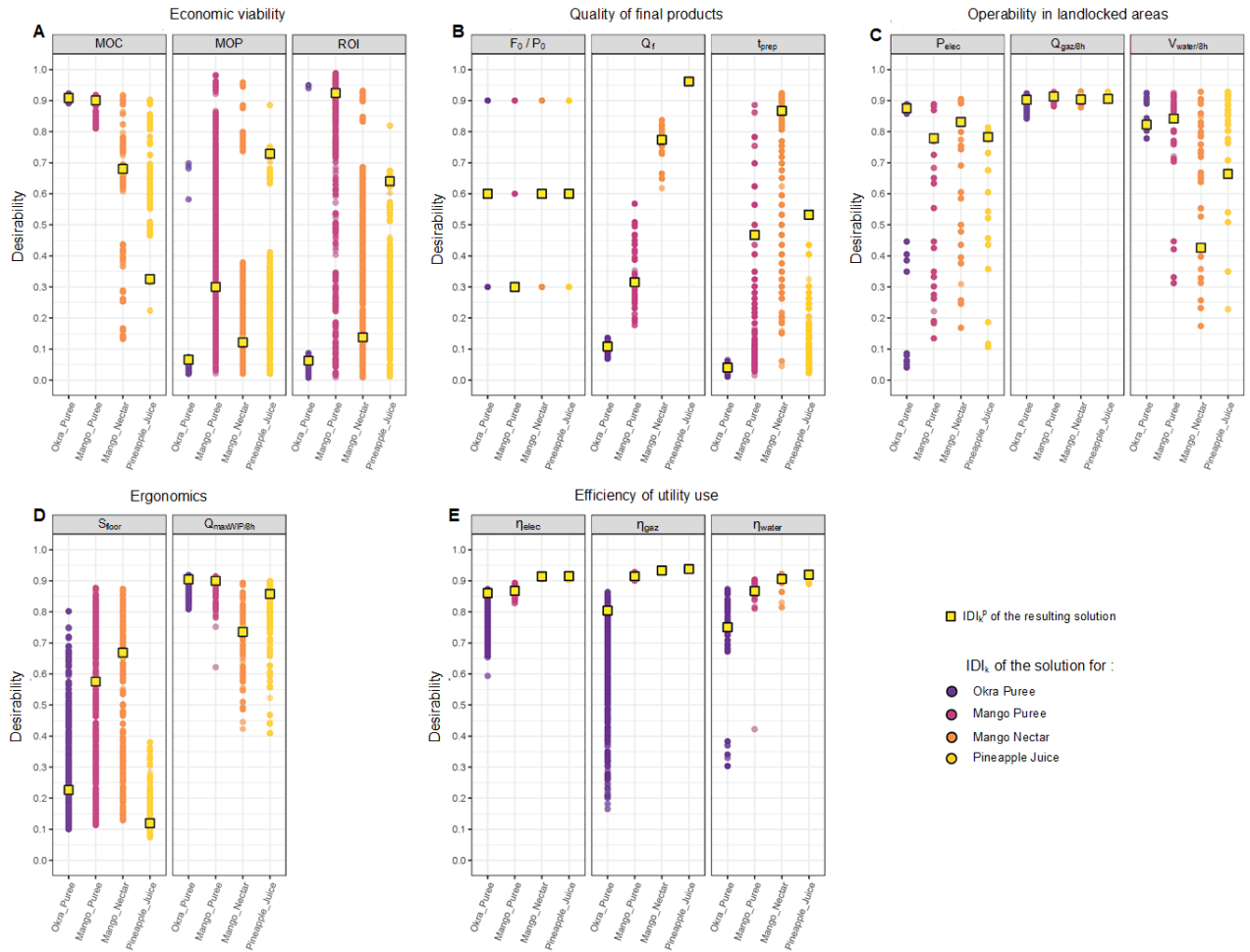


Figure 31 : Overall desirability diagram. Indicator desirability indices (IDI_k^p) calculated per performance indicator k per final product p for the 5 639 solutions of \mathcal{P} (cf. eq. 11). The 14 IDI_k^p are wrapped by objective. IDI_k^p of the resulting solution are represented by a yellow square.

Sur la Figure 31, pour chaque produit, les IDI_k^p de la solution obtenue sont représentés par des carrés jaunes. Cette figure donne donc une vision générale des indicateurs de performance pour lesquels s_{res} est satisfaisante (premier quartile, $IDI_k^p(s_{res}) > 0.75$) ou non (dernier quartile, $IDI_k^p(s_{res}) < 0.25$). Ainsi, pour les 2 objectifs les plus importants (Figures 31A et B), il y a autant de couples produit-indicateur pour lesquels s_{res} est satisfaisante que de couples pour lesquels elle ne l'est pas (6 / 24). A l'inverse, pour les 3 objectifs les moins importants (Figures 31C, D et E), s_{res} satisfait les préférences utilisateurs pour 15 / 32 couples produit-indicateur et ne les satisfait pas pour seulement 2 d'entre eux. Plus précisément, les

indicateurs de performance pour lesquels s_{res} n'est pas du tout satisfaisante (*i.e.* $IDI_k^p(s_{res}) < 0.15$) sont :

- MOP et ROI pour la purée de gombo et le nectar de mangue (Figure 31A),
- \bar{Q}_f et t_{prep} pour la purée de gombo (Figure 31B),
- S_{floor} pour le jus d'ananas (Figure 31D).

Sur la Figure 31, les IDI_k^p des solutions de \mathcal{P} qui ont été calculés par produit p et par indicateur de performance k sont représentés par des ronds de couleur. Leur comparaison avec ceux calculés pour s_{res} (carrés jaunes) permet d'identifier quels sont les couples produit-indicateur:

- Pour lesquels s_{res} est moins satisfaisante que possible. C'est le cas lorsque l' IDI_k^p de la solution obtenue est très inférieur à l' IDI_k^p de certaines solutions pour un couple produit-indicateur. Sur la Figure 31A, c'est par exemple le cas pour le nectar de mangue et pour les fonctions MOP ($IDI_{MOP}^{MN}(s_{res}) = 0.12 / 0.4$) et ROI ($IDI_{ROI}^{MN}(s_{res}) = 0.13 / 0.95$). Sur la Figure 31D, c'est aussi le cas pour le jus d'ananas et la fonction S_{floor} ($IDI_{S_{floor}}^{PJ}(s_{res}) = 0.12 / 0.4$). Cela signifie que la pondération des objectifs et des produits finis qui a été utilisée pour calculer le GDI_{AHP} (*cf.* eq. 14 et eq. 15) a conduit à sélectionner une solution bien moins satisfaisante que possible pour ces couples produit-indicateur.
- Qui n'ont pas contraint l'espace de conception exploré par le NSGA-II. C'est le cas lorsque toutes les solutions sont satisfaisantes (*i.e.* $IDI_k^p > 0.75$) pour un couple produit-indicateur. Sur la Figure 31C, c'est par exemple le cas de l'indicateur $Q_{gaz/8h}$ pour lequel les IDI_k^p de toutes les solutions sont supérieurs à 0.8. Cela signifie que les paramètres et/ou les modèles impliqués dans le calcul de cet indicateur (*e.g.* facteurs de sécurité utilisés pour calculer cet indicateur, seuils de désirabilités définis) et de l' IDI_k^p correspondant (*cf.* seuils de désirabilité définis dans le Tableau 19) sont très peu contraignants et/ou que les hypothèses qui ont été faites trop « généreuses ».
- Qui ont fortement contraint l'espace de conception exploré par le NSGA-II. C'est le cas lorsque toutes les solutions sont peu satisfaisantes (*i.e.* $IDI_k^p < 0.25$) pour un couple produit-fonction. Par exemple, la Figure 31B montre pour la purée de gombo, les fonctions t_{prep} et \bar{Q}_f ne sont satisfaites par aucune solution non-dominées ($IDI_{t_{prep}}^{OP} < 0.1$; $IDI_{\bar{Q}_f}^{OP} < 0.15$). Pour ce produit et ces indicateurs, cela peut signifier que les paramètres et/ou les modèles impliqués dans le calcul des IDI_k^p correspondant étaient trop contraignants. Il faut vérifier l'ensemble des hypothèses et des modèles impliqués leur calcul.

3.1.4. Pertinence des seuils de désirabilité définis

La Figure 32 permet de comparer les performances de s_{res} avec les seuils de désirabilité définis pour les 3 indicateurs de performance les moins bien satisfaits par s_{res} . Elle montre que pour les 3 produits finis à base de fruit, la solution obtenue respecte les seuils imposés. Cependant, les performances de s_{res} sont à la limite de l'acceptable pour le nectar de mangue et l'indicateur MOP d'une part ($MOP^{MN}(s_{res}) = 1382 \text{ €/mois} \gtrsim 1000 \text{ €/mois}$; Figure 32B), et pour le jus d'ananas et l'indicateur S_{floor} d'autre part ($S_{floor}^{PJ}(s_{res}) = 25,8 \text{ m}^2 \lesssim 27 \text{ m}^2$; Figure 32C). Surtout, pour la purée de gombo, s_{res} ne permet ni de préparer un lot de produit dans

l'intervalle de temps souhaité ($t_{prep}^{OP}(S_{res}) = 136 \text{ min} > 90 \text{ min}$; Figure 32A), ni de dégager un résultat d'exploitation positif ($MOP^{OP}(S_{res}) = -103 \text{ €/mois} < 1000 \text{ €/mois}$; Figure 32B).

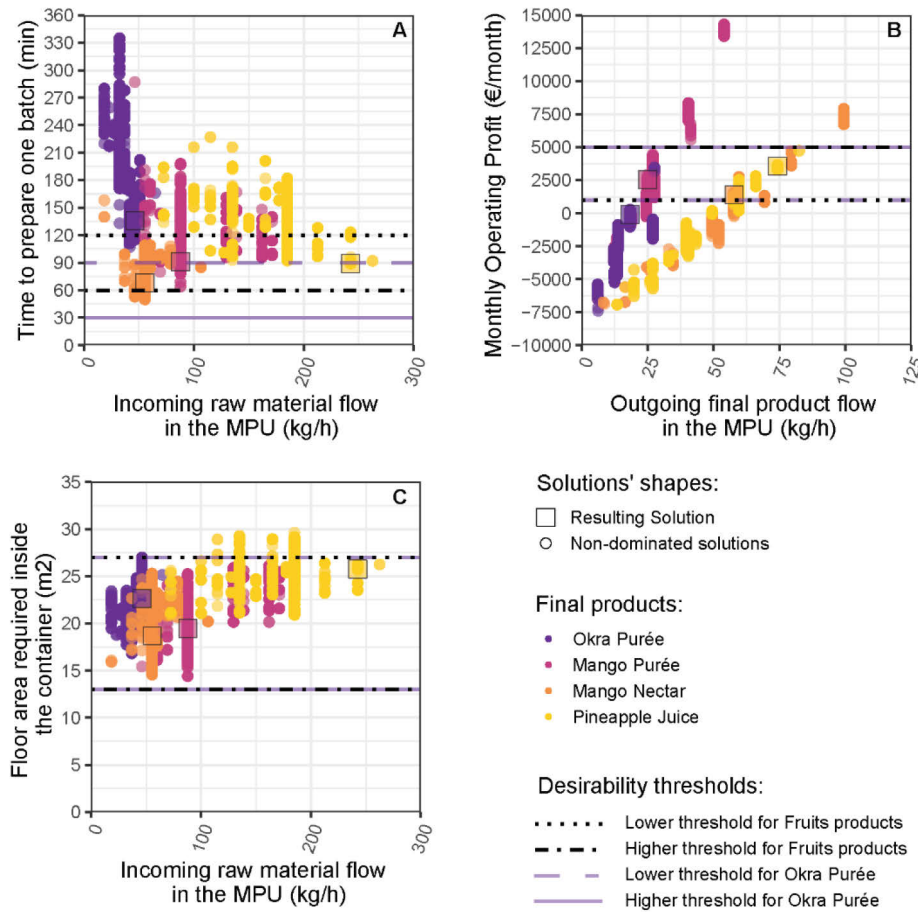


Figure 32 : Values of the performance indicators t_{prep}^p (A), MOP^p (B) and S_{floor}^p (C) as a function of the incoming flow of raw materials (A and C), or the outgoing flow of final products (B) for the 5 639 non-dominated solutions of \mathcal{P} . The values of the resulting solution are represented by a square in the color of the final product. The lower and higher thresholds of desirability defined for each performance indicator are represented by the horizontal lines.

L'analyse de la Figure 32 révèle la nature des compromis nécessaires pour concevoir la MPU. Sur la Figure 32A, on constate que plus le débit de produit entrant (\dot{m}_{in}^p) des solutions est important et plus le temps nécessaire pour préparer un batch diminue. La Figure 32B montre que plus le débit de produit sortant (\dot{m}_{out}^p) des solutions est important et plus le résultat d'exploitation mensuel de la MPU est élevé. Elle montre aussi que pour chaque produit fini, il existe un débit de produit sortant en dessous duquel les solutions ne génèrent pas de bénéfice d'exploitation ($\cong 18 \text{ kg/h}$ pour les purées de gombo et de mangue ; $\cong 55 \text{ kg/h}$ pour le jus d'ananas et le nectar de mangue). Par contre, sur la Figure 32C, on constate que plus le débit du produit entrant est important et plus la surface au sol nécessaire dans le container est importante. La position des solutions non-dominées par rapport aux seuils de desirabilité montre qu'il est difficile d'en trouver une solution qui permettent à la fois (i) d'atteindre des temps de préparation suffisamment courts (Figure 32A), (ii) de dégager un bénéfice d'exploitation (Figure 32B) et (iii) de respecter les contraintes d'encombrement, pour tous les produits finis.

Plus précisément, les résultats visibles sur la Figure 32 montrent qu'aucune solution non-dominée ne respecte le seuil de désirabilité inférieur (90 min) associé à l'indicateur t_{prep} et à la purée de gombo. Cela signifie que ce couple produit-fonction a fortement contraint le NSGA-II lors de l'optimisation. Pour qu'il soit moins contraignant, la Figure 32 montre que le seuil de désirabilité associé devrait à minima être de 120 min. Même si cette valeur est a priori envisageable car le produit a été pré-stabilisé par blanchiment, il conviendrait de vérifier qu'elle est compatible avec l'obtention d'un produit de qualité acceptable.

L'analyse des Figures 28 à 32 a montré que dans l'espace de conception qui a été défini, le NSGA-II n'a trouvé aucune solution de compromis qui satisfasse tous les objectifs de conception pour tous les produits finis. Lors de l'agrégation pondérée, le fait d'accorder la même importance aux 4 produits a conduit à sélectionner une solution à la limite de l'acceptable en terme de « viabilité économique » pour le nectar de mangue d'une part, et en terme de « surface au sol nécessaire dans le container » pour le jus d'ananas d'autre part. L'analyse des résultats a montré que cela est dû à la difficulté de satisfaire l'objectif « qualité des produits finis » pour la purée de gombo. Il convient donc de s'interroger sur le niveau de polyvalence optimal et sur la pertinence :

- i. De maintenir la purée de gombo dans le problème de conception et/ou,
- ii. De lui attribuer un poids aussi important que les 3 autres produits finis lors du calcul du GDI_{AHP} (cf. eq. 15).

3.2. Performances de la solution obtenue et faisabilité dans le contexte d'utilisation

A chaque niveau fonctionnel, les performances prédites de la solution obtenue ont été analysées afin de valider qu'elles sont réalistes dans le contexte d'utilisation. Pour cela, les indicateurs intermédiaires à partir desquels les indicateurs de performance ont été calculés, ont été visualisé grâce à des représentations graphiques adaptées.

3.2.1. Performances de la solution obtenue au niveau de l'atelier

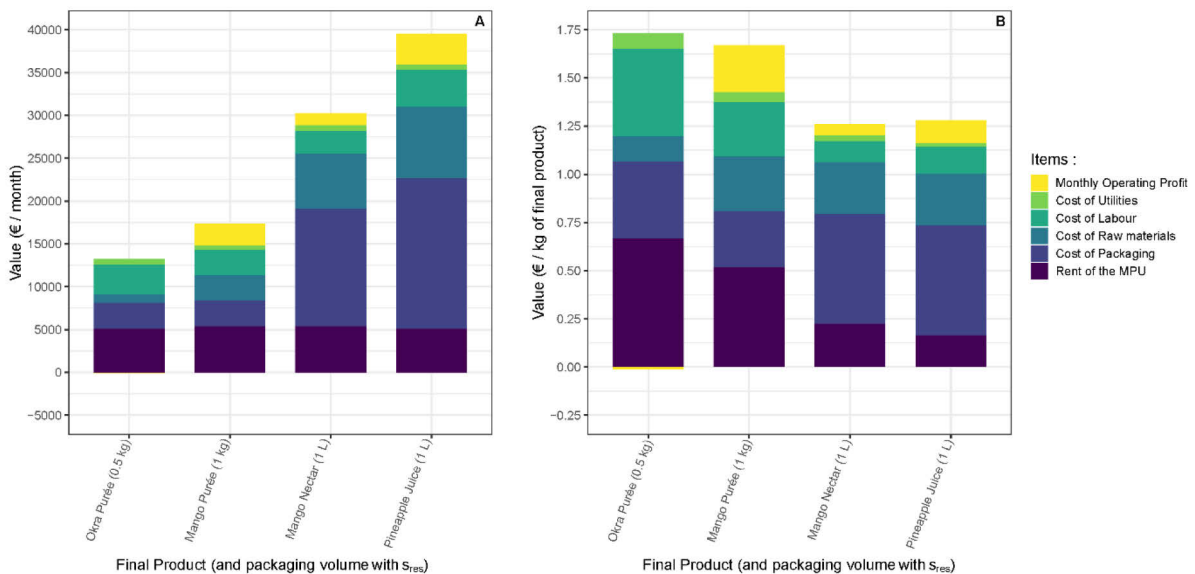


Figure 33 : Breakdown of monthly operating revenue (A) and selling prices (B) of the four final products (and their packaging volume) with the resulting solution.

La représentation graphique des indicateurs intermédiaires à partir desquels ont été calculés les 3 indicateurs de performance associés à l'objectif « viabilité économique » (Figure 33) permet d'analyser les performances économiques de s_{res} par produit fini. La Figure 33A montre que s_{res} permet de générer un chiffre d'affaire mensuel environ deux fois plus important pour les produits liquides ($MOR^{MN}(s_{res}) = 30\,270$ €/mois; $MOR^{PJ}(s_{res}) = 39\,537$ €/mois) que pour les purées ($MOR^{OP}(s_{res}) = 13\,148$ €/mois; $MOR^{MP}(s_{res}) = 17\,368$ €/mois). De plus, la solution obtenue dégage un bénéfice d'exploitation pour les 3 produits à base de fruits ($MOP^{PJ}(s_{res}) = 3568$ €/mois; $MOP^{MP}(s_{res}) = 2529$ €/mois; $MOP^{MN}(s_{res}) = 1382$ €/mois) mais pas pour la purée de gombo ($MOP^{OP}(s_{res}) = -103$ €/mois). Par contre, les charges d'exploitation mensuelles engendrées par l'exploitation de la MPU obtenue (location; achat des matières premières et des emballages ; paiement de la main d'œuvre et des utilités) sont également deux fois plus importantes pour les produits liquides ($MOC^{MN}(s_{res}) = 28\,890$ €/mois ; $MOC^{PJ}(s_{res}) = 35\,970$ €/mois) que pour les purées ($MOC^{OP}(s_{res}) = 13\,250$ €/mois; $MOC^{MP}(s_{res}) = 14\,840$ €/mois). Ces différences expliquent pourquoi la purée de mangue est le produit qui présente le meilleur taux de retour sur investissement ($ROI^{MP}(s_{res}) = 17.0$ % ; $ROI^{PJ}(s_{res}) = 9.9$ % ; $ROI^{MN}(s_{res}) = 4.8$ % ; $ROI^{OP}(s_{res}) = -0.8$ %).

La Figure 33B montre que l'achat des bouteilles en verre représente près de 50 % du coût de revient du nectar de mangue et du jus d'ananas. Mais comme le débit de la MPU est plus élevé pour ces deux produits (58 kg/h pour le nectar de mangue; 74 kg/h pour le jus d'ananas), le coût de location de la MPU est réparti sur une quantité de produit fini plus importante et leur coût de revient est plus faible (1.2 €/L pour le nectar de mangue et 1.16 €/L pour le jus d'ananas). A l'inverse, malgré le coût plus modéré des emballages souples (partie 3.5 de l'Annexe n°1), le débit plus faible de la MPU pour les purées (18 kg/h pour la purée de gombo; 25 kg/h pour la purée de mangue) explique pourquoi leur coût de revient est plus élevé (1.73 €/kg pour la purée de gombo et 1.42 €/kg pour la purée de mangue). Cette différence de débit explique également pourquoi la part de la main d'œuvre dans le coût de revient de la purée de gombo (26 %) est beaucoup plus importante que dans celui du jus d'ananas (11 %), alors que le nombre d'opérateurs nécessaire pour faire fonctionner la MPU en configuration purée de gombo est moins importante (8 opérateurs / rotation de 8 h, 3460 €/mois) que celui de la configuration jus d'ananas (11 opérateurs / rotation de 8 h, 4284 €/mois). Ces résultats montrent donc que si la capacité de production de la MPU était plus importante pour la purée de gombo, les performances économiques de s_{res} seraient probablement plus satisfaisantes pour ce produit.

L'analyse de la Figure 33 montre que les performances économiques qui ont été prédites pour s_{res} sont réalistes dans le contexte d'utilisation. Cependant, ces performances dépendent assez fortement du prix d'achat des emballages, du prix de vente des produits finis et de la quantité mensuelle de produit fini sur laquelle les coûts fixes seront répartis. Pour valider que s_{res} sera viable économiquement, il est donc nécessaire de vérifier que les hypothèses et les modèles qui ont permis d'estimer ces prix et ces quantités sont réalistes. Il s'agit en particulier de vérifier :

- i. Les hypothèses qui ont été faites pour estimer les coûts logistiques (partie 3.5 de l'Annexe 1) liés à l'approvisionnement de la MPU en emballages et à la distribution des produits finis (jusqu'à environ 31 000 bouteilles de jus d'ananas / mois, soit l'équivalent de 2 containers 20 pieds / mois).
- ii. Les hypothèses concernant l'organisation des campagnes de production (2 mois / campagne ; 6 jours de production / semaine; 2 rotation de 8h / jour).
- iii. Le modèle d'ordonnancement de la production (au niveau du procédé) qui a permis d'estimer la capacité de production de la MPU pour chacun des produits finis.

3.2.2. Performances de la solution obtenue au niveau du procédé

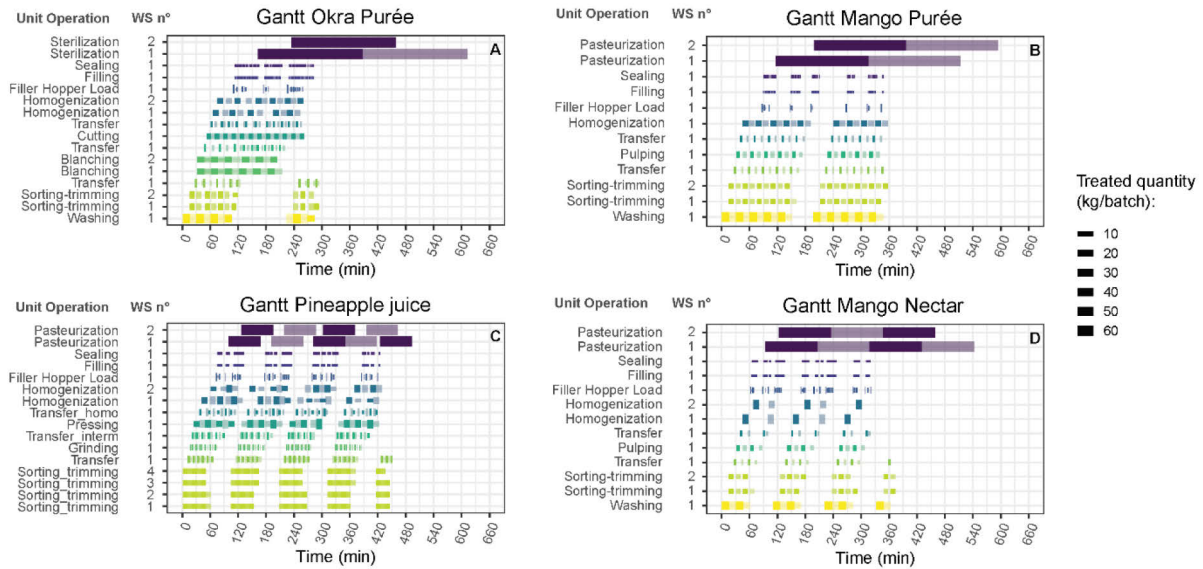


Figure 34 : 8-hour rotation production scheduling per final product simulated for the resulting solution by the DES. The colors help to distinguish the unit operations from each other. For each unit operation, the identification number of workstation (WS) is given on the left and the height of the batches is proportional to the quantity processed.

Les diagrammes de Gantt de s_{res} qui sont présentés sur la Figure 34 ont été obtenus à partir de la simulation d'une journée de production par le DES. Le nombre de rectangles correspondant à la stabilisation thermique (en violet) indique quel est le nombre de lots que la solution obtenue peut produire par rotation, pour chaque produit fini. Ainsi, par rotation, l'utilisation alternée des 2 autoclaves de s_{res} permet de traiter 3 lots de 98 sachets de 500g de purée de gombo, 4 lots de 50 sachets de 1 kg de purée de mangue, 7 lots de 66 bouteilles de 1 L de nectar de mangue et 9 lots de 66 bouteilles de 1 L de jus d'ananas. Selon les produits finis, l'observation des diagrammes de Gantt montre que ces capacités de production ($Q_{prod/8h}^p$) sont plus ou moins réalistes :

- Pour la purée de gombo, l'analyse de la Figure 34A montre que pendant une rotation, un 4^{ème} lot pourrait être stérilisé avec le 2^{ème} autoclave si la durée de rotation définie dans le scénario d'utilisation avait été de 9h (au lieu de 8h). Pour la purée de mangue, l'analyse de la Figure 34B montre que la pasteurisation des 4 lots de purée de mangue dure un tout petit peu moins de 8 h (477 min). Par conséquent, si la simulation de la stabilisation thermique a sous-estimé t_{stab}^{MP} de 2 min ou plus (soit 198 min/batch au lieu de 196 min/batch pour charger, pasteuriser et décharger la purée de mangue dans l'autoclave), seuls 3 lots pourront être pasteurisés pendant une rotation de 8 h. Ces résultats montrent qu'au niveau du procédé, l'estimation de la capacité de production de la MPU dépend fortement (i) de la durée d'une rotation de travail pour l'équipe n°4 (en charge de la stabilisation thermique) et (ii) des hypothèses et modèles impliqués dans le calcul de t_{stab}^p au niveau de l'opération unitaire (cf. partie 1.12 de l'annexe n°1).
- Pour le jus d'ananas (Figure 34C), l'existence de temps d'attente entre les batches de pasteurisation des différents lots suggère que le DES a sous-estimé la capacité de production de s_{res} pour ce produit. L'analyse de la Figure 34B montre que c'est aussi le cas pour le nectar de mangue. En effet, pendant les 8 h (480 min) de travail de l'équipe n°4, il aurait été possible de produire un 8^{ème} lot avec l'autoclave n°2 (soit 477

min entre la pasteurisation du premier et du dernier batch au lieu des 448 min obtenues par le DES). L'observation des Figures 34B et C suggère que ces sous-estimations sont probablement dues à la façon avec laquelle le lancement des lots « juste à temps » a été modélisé (cf. partie 2 de l'Annexe n°1).

Le diagramme de Gantt de la purée de gombo (Figure 34A) montre qu'avant la stérilisation, les opérations unitaires de blanchiment et de broyage constituent un goulot d'étranglement pour ce produit. En effet, le blancheur et le cutter de s_{res} ont une petite capacité (respectivement 10 et 8 kg/batch) mais des temps de chargement, d'exécution et de déchargement assez élevés (respectivement 15 et 9 min/batch). Cela explique pourquoi le temps de préparation d'un lot de purée de gombo ($t_{prep}^{OP}(s_{res}) = 136$ min) est bien supérieur au seuil de désirabilité inférieur défini (90min).

Bien que les diagrammes de Gantt de la Figure 34 ne correspondent pas à un ordonnancement de production optimal, leur analyse montre que pour les 4 produits finis, la capacité de production de s_{res} a plutôt été sous-estimée par le DES. Cependant, l'analyse de la Figure 31 a montré que certains couples produit-indicateur ne sont pas satisfaits par la solution obtenue (MOP^{OP} et MOP^{MN} , ROI^{OP} et ROI^{MN}), ni par aucune autre solution non-dominée (t_{prep}^{OP}). Comme la valeur de ces indicateurs dépend des résultats du DES, il est donc nécessaire de vérifier que :

- i. Les hypothèses et les modèles utilisées au niveau du procédé sont réalistes (*i.e.* temps de travail de l'équipe n°4 par rotation et modélisation du lancement « juste à temps » des lots dans le DES),
- ii. Les modèles de blancheurs et de cutters possibles (pour les variables de conception e_{blanch} et e_{cutt}) ont des capacités suffisamment variées et que les facteurs de sécurité ayant été appliqués pour estimer leur durée opératoire ne sont pas trop pessimistes (cf. parties 1.5 de l'Annexe n°1).
- iii. Les hypothèses et les modèles qui ont été utilisés, au niveau de l'opération unitaire, pour estimer t_{stab}^p (cf. partie 1.12 de l'Annexe n°1) ne sous-estiment pas la valeur de t_{stab}^p .

3.2.3. Performances de la solution obtenue au niveau de l'opération unitaire

Pour chaque produit fini, les graphiques de la Figure 35 montrent quelles sont les durées des cycles de stabilisation thermique (Figure 35A) et la qualité moyenne restante dans les produits finis (Figure 35B) qui ont été estimées par le modèle de traitement thermique pour l'autoclave de la solution obtenue et quelles que soient les conditions opératoires.

La Figure 35A indique que les hypothèses qui ont été faites pour modéliser le traitement thermique des 4 produits finis (cf. partie 1.12.2 de l'Annexe n°1) ont permis de générer des résultats cohérents ($t_{stab}^{PJ} < t_{stab}^{MN} < t_{stab}^{MP} < t_{stab}^{OP}$) avec le fait que les transferts de chaleurs sont beaucoup plus rapides dans le jus d'ananas et le nectar de mangue que dans les purées de mangue ou de gombo. Par contre, pour les produits à base de fruit, les temps de cycle dans l'autoclave ($t_{stab}^{PJ} > 35$ min ; $t_{stab}^{MN} > 85$ min ; $t_{stab}^{MP} > 175$ min) peuvent sembler assez long pour de la pasteurisation. Cela est lié au fait que la pasteurisation a été modélisée en faisant l'hypothèse que l'eau de chauffe de l'autoclave serait renouvelée entre chaque cycle. Par conséquent, pour tous les produits, t_{stab}^p correspond au temps pour chauffer et refroidir l'eau et le produit fini (cf. figure A.1 dans l'Annexe n°1). Mais pour augmenter la cadence d'utilisation

de l'autoclave tout en réalisant des économies d'eau et d'énergie, il serait probablement mieux de plonger les produits à pasteuriser dans l'eau déjà chaude de l'autoclave puis de les refroidir dans une cuve de refroidissement dédiée. Pour les produits à base de fruit, les valeurs de t_{stab}^p qui ont été estimées sont probablement supérieures aux temps réels qui seront atteints par l'utilisateur.

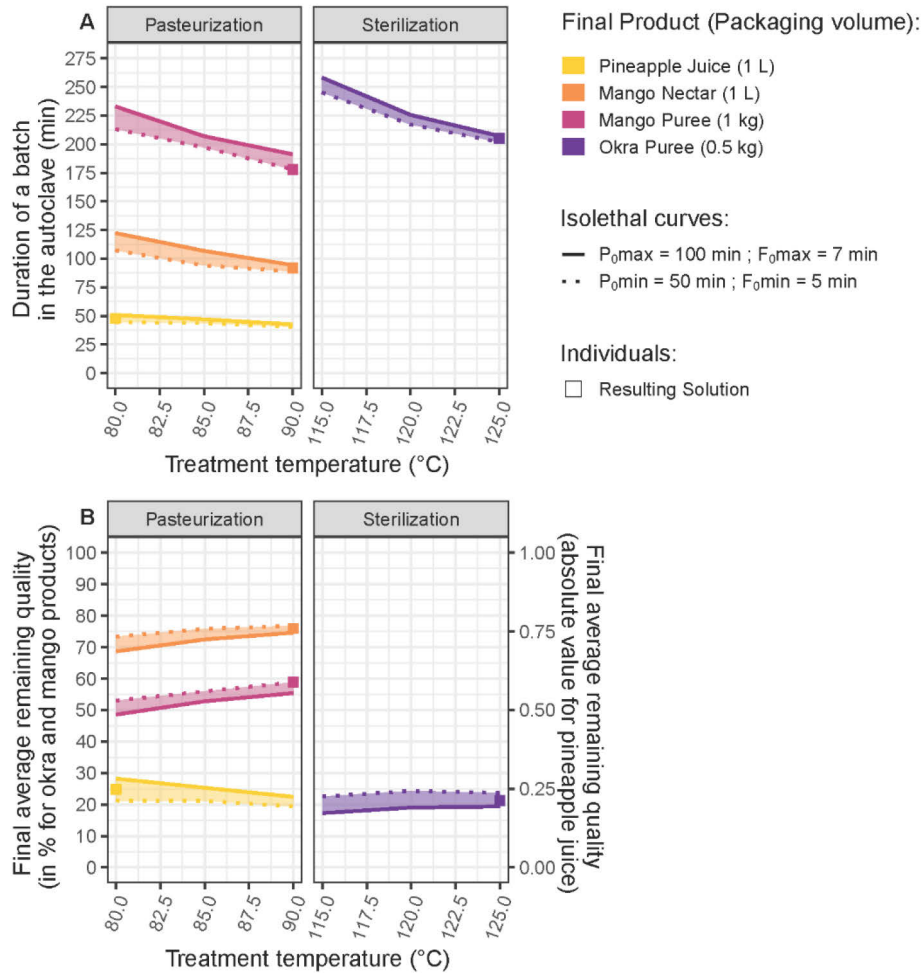


Figure 35: Thermal stabilization cycle durations (t_{stab}^p) (A) and average quality remaining in the final product (\overline{Q}_f^p) (B) estimated per final product by the heat treatment model for all possible combinations of operating conditions (treatment temperatures and pasteurization/sterilization values) with the autoclave of the resulting solution. For each product, the values of t_{stab}^p and \overline{Q}_f^p corresponding to the operating conditions of the resulting solution are represented by square. Note that in chart B, the scale corresponding to pineapple juice is shown on the right side.

Pour les 3 produits à base de fruit, les résultats visibles sur la Figure 35B suggèrent qu'il est possible de conserver un niveau de qualité acceptable avec le modèle d'autoclave de s_{res} . Par contre, l'impact de la stérilisation sur la qualité de la purée de gombo est tel (au moins 75 % de dégradation) qu'il ne semble pas faisable d'obtenir une qualité acceptable avec cet autoclave. L'analyse des autres résultats (données non montrées) montre que les autres modèles d'autoclaves définis dans cette étude (cf. partie 1.12.1 de l'Annexe n°1) ne permettent pas d'obtenir une qualité organoleptique significativement meilleure pour la purée de gombo.

Pour tous les produits finis, la Figure 35B montre qu'avec le modèle d'autoclave de s_{res} , l'effet des conditions opératoires sur $\overline{Q_f^p}$ n'est pas aussi fort que ce qui était imaginé quand T_{hold} et P_0/F_0 ont été définies comme variables de conception. Ces résultats suggèrent que leur valeur pourrait être fixée afin de diminuer le nombre de variables de conception et donc réduire la taille de l'espace de conception.

L'analyse de la Figure 35 montre qu'au niveau de l'opération unitaire, les temps de cycle dans l'autoclave qui sont prédits pour l'autoclave de s_{res} sont réalistes. Pour les produits à base de fruits, la probable surestimation de ces temps garantit que la capacité de production qui a été estimée au niveau du procédé soit atteignable. A l'exception de la purée de gombo, il semble possible de conserver un niveau acceptable de qualité organoleptique et nutritionnelle dans les produits avec l'autoclave de la solution obtenue. Afin de valider le choix de cet équipement, un travail expérimental doit désormais être conduit pour s'assurer que les barèmes prédits par le modèle (i) permettent de garantir la qualité sanitaire des produits finis et (ii) permettent de préserver un niveau de qualité organoleptique et nutritionnel acceptable pour le consommateur. Si ce travail expérimental confirme qu'il n'est pas possible de stériliser la purée de gombo tout en préservant un niveau acceptable de qualité, ce produit devra être supprimé du problème de conception (ou remplacé par un autre légume).

3.3. Cohérence des décisions de conception associées à la solution obtenue

Après avoir validé l'optimalité et la faisabilité de la solution obtenue, son contenu a été analysé et comparé avec les 36 solutions les plus satisfaisantes (cf. Annexe n°3) afin de vérifier que les décisions de conception correspondantes étaient cohérentes.

Tout d'abord, il faut noter que comme pour toutes les autres solutions, l'encombrement des équipements contenus dans la solution obtenue (cf. tableau A.45 en Annexe n°3) nécessite d'aménager la MPU dans un container 40 pieds et d'utiliser un système de levage d'une capacité de 10 tonnes (cf. partie 3.3.2 de l'Annexe n°1).

Pour la majorité des variables équipements (10/14), les modalités de s_{res} sont les mêmes que pour les 36 solutions les plus satisfaisantes (cf. partie 2 de l'annexe n°3). Certaines solutions satisfaisantes différaient de la solution obtenue pour 4 variables équipements (nombre et modèle de blancheur ; modèle de doseuse ; modèle de thermoscelleuse sous vide). Mais la comparaison des caractéristiques des équipements possible et l'analyse du contenu de s_{res} ont montré que sa structure d'atelier constitue une réponse cohérente et pertinente au problème de conception tel qu'il a été formulé.

L'observation des caractéristiques des modèles d'équipements contenus dans s_{res} a également permis de mieux comprendre la nature des décisions de conception correspondant à la solution obtenue. En particulier, le choix du modèle d'autoclave semble avoir été fortement influencé par les hypothèses effectuées à propos (i) du fonctionnement des pompes de circulation et de recyclage-aspersion et (ii) des économies d'eau et d'énergie que ces pompes permettent ou non (cf. partie 1.12.1 de l'Annexe n°1). En effet, la solution obtenue contient 2 unités du modèle (no 11) qui est 54% plus onéreux que le modèle de capacité équivalente mais ne disposant pas de ce type de pompe (no 9). Il est donc nécessaire de valider expérimentalement que la pompe de recyclage-aspersion dont dispose le modèle no 11 permet de réaliser des économies d'eau et de gaz suffisamment importantes pour justifier qu'il est préférable au modèle no 9.

Le travail d'analyse a également permis de valider les conditions dans lesquelles la MPU devrait être utilisée (formats des emballages, conditions opératoires de la stabilisation

thermique et nombre d'opérateurs dans les équipes n°1 et n°2) pour atteindre les performances souhaitées (cf. tableau A.47 de l'annexe n°3). Ces conditions devront être validées expérimentalement.

3.4. Priorisation des améliorations possibles

La visualisation et à l'analyse des résultats révèle que les décisions de conception qui sont associées à la solution obtenue sont cohérentes et que les performances prédites pour cette solution sont réalistes dans le contexte du scénario d'utilisation. Cependant l'analyse des résultats a montré que s_{res} n'est pas satisfaisante pour la purée de gombo et qu'elle est moins satisfaisante que possible pour le nectar de mangue et le jus d'ananas. Ceci s'explique par la forte contrainte exercée par la purée de gombo pendant le processus d'optimisation (recherche des solutions non-dominées et sélection de la meilleure d'entre elles).

Cela peut aussi être dû aux nombreuses approximations et hypothèses simplificatrices qui ont été faites pour construire l'outil d'aide à la décision. En effet, pour que le temps de calcul du simulateur soit compatible avec l'optimisation, des modèles simplifiés ont été choisis pour représenter certains phénomènes complexes. De plus, comme certaines données étaient insuffisantes et/ou approximatives (e.g. paramètres des cinétiques de dégradation de la qualité des aliments, caractéristiques réelles de certains équipements, prix), des hypothèses et/ou des facteurs de sécurité ont été utilisées pour définir certains paramètres.

Dans ce contexte, pour parvenir à une solution plus satisfaisante, plusieurs améliorations de l'outil sont possibles. Afin que leur mise en œuvre soit compatible avec la contrainte d'efficacité du processus de conception (recherche de la meilleure solution le plus rapidement possible), les ressources nécessaires doivent être allouées de façon stratégique (Ming *et al.*, 2021; Panchal *et al.*, 2013, 2005). Pour cela, les améliorations identifiées au cours des étapes précédentes ont été priorisées en tenant compte du rapport entre leur utilité potentielle pour la décision de conception et du coût de leur mise en œuvre (cf. tableau A.48 de l'Annexe n°3). Les trois améliorations prioritaires sont les suivantes :

1. Diminuer l'importance relative (w_p) accordée à la purée de gombo et augmenter celle accordée aux 3 autres produits finis, lors du calcul du GDI_{AHP} (eq. 15). Cette modification des préférences devrait avoir un effet important sur le niveau de satisfaction globale des solutions non-dominées et conduire à en sélectionner une qui soit plus satisfaisante pour le nectar de mangue et le jus d'ananas. Comme le coût de cette modification est négligeable, cette amélioration est prioritaire.
2. Réaliser des essais expérimentaux pour valider que les barèmes prédits par le modèle de stabilisation thermique permettent de garantir la qualité sanitaire des produits finis et permettent de préserver un niveau de qualité organoleptique acceptable pour le consommateur. Ces essais sont d'autant plus utiles pour la décision de conception qu'ils permettront de vérifier les temps de cycle dans l'autoclave et donc de valider la capacité et la viabilité économique de la MPU. Les ressources nécessaires pour réaliser ces essais ne sont pas négligeables.
3. Réaliser des essais expérimentaux chez les fournisseurs d'autoclaves pour vérifier que par rapport à une simple pompe de circulation, les économies d'eau et de gaz permises par les pompes de recyclage-aspersion sont significatives. Ces essais sont utiles pour la décision de conception car ils conditionneront le choix de l'autoclave (et son coût). Cependant, la mise en œuvre de ces essais nécessite de mobiliser des ressources non négligeables.

4. Conclusions

Dans cette étude de cas, la Methodology for the Integrated, Multi-scale and Multi-Objective Design of Systems (MIMMODS) a été utilisée pour optimiser la conception d'une unité mobile de transformation alimentaire multi-produit. Ce travail a permis d'illustrer comment les différentes étapes de MIMMODS, qui ont été décrites de façon générique dans le chapitre 5, pouvaient être mises en œuvre dans un cas particulier.

Pour concevoir une unité mobile de transformation de fruits et légumes, un outil d'aide à la conception a été développé. A l'issue de l'optimisation, les résultats générés par l'outil ont été visualisés et analysés afin de vérifier que la solution de conception obtenue constituait un compromis satisfaisant, faisable et cohérent. L'observation des indices de désirabilité de la solution obtenue et leur comparaison avec ceux des autres solutions non-dominées a permis de comprendre quels étaient les produits finis, les objectifs de conception, les indicateurs de performance et les modèles de préférence qui ont le plus contraint le processus d'optimisation (recherche des solutions non-dominées et sélection de la meilleure d'entre elles). Ce faisant, ce travail a renforcé le niveau de compréhension du problème de conception et de questionner les préférences du décideur et des utilisateurs. Par ailleurs, l'analyse du contenu et des performances de la solution obtenue a aidé à comprendre quels étaient les variables de conception, les modèles et les hypothèses dont dépendaient le plus la décision de conception. Pour parvenir à une solution plus satisfaisante, plusieurs améliorations de l'outil sont possibles. Afin d'allouer les ressources nécessaires à leur mise en œuvre de façon stratégique, elles ont été priorisées en tenant compte du rapport entre leur utilité potentielle pour la décision de conception et de leur coût de mise en œuvre.

L'analyse des résultats a montré que l'incertitude et/ou l'imprécision de certaines variables de conception, de certains paramètres et de certains modèles génère une incertitude sur les valeurs des indicateurs de performance et des indices de désirabilité qui sont prédites par l'outil. Des méthodes existent pour réduire ces incertitudes et/ou prendre en compte la fiabilité (probabilité de défaillance) et la robustesse (sensibilité aux incertitudes) des solutions pendant le processus d'optimisation (e.g. Allen et al., 2006; Dawei et al., 2021; Quirante, 2012). Un travail complémentaire doit donc être mené pour (i) définir si d'un point de vue méthodologique, il est nécessaire et pertinent d'intégrer à MIMMODS ces méthodes et (ii) comment, à quel moment et dans quelles conditions leur utilisation permettrait d'améliorer la qualité et l'efficacité du processus de conception.

Remerciements:

The authors would like to thank Mr. Nono (AS Food International) for his support and Harouna Chaibou Adamou for his contribution to the thermal stabilisation modelling work.

Discussion Générale

Discussion Générale

Le principal objectif de cette étude était de concevoir une unité mobile de transformation de fruits et légumes (dont le gombo). Pour atteindre cet objectif, plusieurs difficultés ont dû être surmontées :

- 1) Au début de cette étude, le contexte d'utilisation de la MPU et le problème de conception (scénario d'utilisation, objectifs de conception et variables de conception) étaient mal définis.
- 2) Le gombo était le principal produit fini devant pouvoir être transformé par l'unité mobile mais sa qualité texturale était dégradée par le procédé de conservation. De plus, la dégradation de cette qualité texturale au cours du traitement thermique n'avait jamais été étudiée et la façon de la mesurer instrumentalement était inconnue.
- 3) Lors d'études antérieures, la méthode OIA avait été développée pour optimiser la conception d'équipements et d'opérations unitaires (Quirante, 2012; Raffray, 2014; Rivier, 2017) mais n'avait jamais été utilisée pour optimiser la conception d'un atelier de transformation (i) constitué de plusieurs types d'équipements, (ii) devant pouvoir mettre en œuvre plusieurs opérations unitaires et (iii) devant être capable de fabriquer différents types de produits finis. En l'état, elle ne permettait pas de concevoir un système complexe composé de plusieurs niveaux fonctionnels et dans lequel les phénomènes qui se produisent présentent des échelles de temps caractéristiques différentes.

Dans ce contexte, une stratégie de conception « bottom-up » a été mise en œuvre dans cette étude. Celle-ci a consisté à (i) mieux connaître le produit (la purée de gombo), (ii) modéliser la dégradation de sa qualité au cours d'une opération unitaire (la stérilisation) (iii) intégrer ce modèle pour construire un outil d'aide à la conception et (iv) utiliser cet outil pour concevoir l'UMT (cf. partie 4.2 du Chapitre 1).

Ce chapitre a pour objet de discuter les intérêts et les limites de cette stratégie de conception « bottom-up » du point de vue (i) des objectifs définis pour le gombo, et (ii) de l'objectif relatif à la conception de l'UMT. Dans un second temps, les principaux apports méthodologiques de cette étude seront discutés et les applications possibles de MIMMODS seront développés.

1. Avantages et inconvénients de la stratégie de conception mise en œuvre

1.1. Amélioration de la connaissance du gombo et de la texture gluante

Grâce à la stratégie mise en œuvre, les deux objectifs liés à la mesure et au suivi de la dégradation du principal indicateur de qualité du gombo ont été atteints. Les principaux résultats de ce travail sont les suivants :

- 1) Les suspensions gluantes préparées à base de gombo sont des fluides structurés qui présentent des propriétés viscoélastiques, rhéofluidifiantes, adhésives, filantes, ductiles et cohésives. Parmi les mesures instrumentales permettant de mesurer ces propriétés rhéologiques et texturales, l'indice de consistance K et l'indice d'écoulement n sont bien corrélés avec leurs propriétés visqueuses, viscoélastiques et adhésives. De plus, la mesure instrumentale du filant est bien corrélée avec leurs propriétés

élongationnelles, cohésives et ductiles. Ces mesures instrumentales sont suffisantes pour caractériser les propriétés rhéologiques et texturales de ces suspensions et nécessaires pour les discriminer en fonction du procédé et de la formulation avec lesquels elles ont été préparées.

- 2) La texture des sauces gluantes préparées à base de gombo peut être évaluée à l'aide de descripteurs faisant référence à leurs propriétés mécaniques (« Compactness », « Firmness », « Thickness », « Elasticity-resilience », « Stringiness », « Adhesiveness ») et à leurs propriétés fonctionnelles (« Seizability », « Divisibility », « Chewiness-work in mouth », « Lubricating »). Alors que le filant est un descripteur très peu utilisé en analyse sensorielle, cette étude a montré qu'il contribue fortement à la perception sensorielle de la texture gluante. Pour autant, la mesure instrumentale de ce descripteur ne permet pas à elle seule de prédire totalement le niveau de gluant perçu sensoriellement. En effet, la perception de la texture gluante résulte de la perception combinée de la consistance et des propriétés élongationnelles des sauces préparées avec du gombo. Ainsi, pour une consistance donnée, le niveau de gluant d'une sauce est perçu différemment selon que ses propriétés élongationnelles sont plus ou moins importantes. De plus, pour un niveau de filant donné, le niveau de gluant d'une sauce est perçu différemment selon que sa consistance est plus ou moins épaisse. Alors que la notion de gluant n'était jusqu'ici pas définie de façon claire et cohérente dans la littérature (cf. partie 3.5 du Chapitre 1), le travail expérimental mené dans cette étude a permis de définir le gluant comme « une propriété texturale complexe résultant de la perception subjective et combinée du filant et de la viscosité de matrices semi-solides ». Pour la mesurer et prédire sa perception sensorielle, il faut combiner la mesure instrumentale de l'indice de consistance K avec celle du filant. Ensemble, ces deux mesures sont nécessaires et suffisantes pour suivre l'effet du procédé sur les propriétés texturales des ingrédients gluants.
- 3) La dégradation de l'indice de consistance K et du filant des purées de gombo pendant le traitement thermique a été suivie en fonction du temps et de la température de traitement et pour différents pH. La dégradation de ces paramètres a été modélisée avec un modèle cinétique d'ordre 1 et l'équation d'Arrhenius. L'analyse des paramètres cinétiques identifiés a montré que l'augmentation de la température de traitement entraîne une accélération de la vitesse de dégradation des propriétés texturales du gombo. Quels que soient la température et le pH, les propriétés élongationnelles des purées de gombo se dégradent plus vite que leurs propriétés visqueuses. Alors que le pH des purées n'a pas d'effet sur la vitesse de dégradation de leur consistance, la dégradation de leurs propriétés filantes est moins rapide à pH 7 qu'à pH 5. Comme la perception sensorielle du gluant est très corrélée à la mesure du filant, ces résultats montrent que pour préserver au mieux les propriétés gluantes des purées de gombo, il est préférable de les alcaliniser avant de les stabiliser thermiquement. Les paramètres cinétiques identifiés pour décrire la dégradation du filant à pH 7 ($k_{ref} = 4,98 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ et $E_a = 128 \text{ kJ.mol}^{-1}$) ont donc été utilisés pour construire un modèle permettant de prédire la qualité texturale finale des purées en gombo en fonction des conditions opératoires du traitement thermique (barème, valeur stérilisatrice et/ou pasteurisatrice).

Les résultats du travail mené sur le gombo et la mesure instrumentale de la texture gluante ouvrent plusieurs perspectives de recherche :

- Les deux méthodes instrumentales qui permettent de caractériser la texture gluante du gombo pourraient être utilisées pour d'autres procédés et d'autres ingrédients gluants. Par exemple, compte tenu de l'importance du gombo séché dans les habitudes de

consommation ivoirienne, elles pourraient être utilisées pour suivre et modéliser l'évolution des propriétés gluantes du gombo au cours de son séchage, afin d'en améliorer la qualité. Ces deux mesures pourraient également être utilisées pour rechercher des voies de transformation d'autres ingrédients ayant des propriétés gluantes comme les amandes du fruit d'*Irvingia gabonensis*, l'écorce de *Triumfetta cordifolia* et les feuilles d'*Adansonia digitata* et de *Corchorus olitorius*. Elles pourraient également être utilisées dans le cadre de programmes de sélection variétale de ces espèces végétales.

- Pour identifier les leviers qui permettraient de diminuer l'effet du procédé de conservation sur les propriétés rhéologiques et texturales du gombo, un travail complémentaire pourrait être mené sur les pectines de gombo. En particulier, leur dépolymérisation sous l'effet de la chaleur peut être à l'origine de la perte de texture engendrée par la stabilisation thermique. Il serait donc intéressant d'étudier quels sont les mécanismes biochimiques qui sont impliqués dans ces dégradations et de faire le lien avec les modifications rhéologiques et texturales des suspensions gluantes.
- Pour compléter le travail mené sur la texture gluante, une analyse sensorielle auprès des consommateurs africains serait nécessaire pour déterminer quel est le niveau de consistance et de filant qui est attendu par les consommateurs africains pour qu'ils jugent la texture d'une sauce gluante comme optimale. A la manière de Bugaud *et al.* (2016), un protocole expérimental fondé sur la méthode « Just-About-Right » (Rothman & Parker, 2009) pourrait être mis en œuvre pour identifier (i) la consistance et le niveau de filant que devrait avoir une purée de gombo pour que sa qualité texturale soit maximale et (ii) les valeurs limites en deçà (ou au-delà) desquelles la qualité texturale de la purée de gombo n'est pas du tout satisfaisante.

1.2. Analyse critique de la stratégie mise en œuvre pour concevoir l'UMT

Cette étude montre que la conception d'un atelier de transformation de façon intégrée, multi-objectif et multi-échelle constitue un problème complexe qu'il est possible de résoudre avec un outil d'aide à la conception. L'un des avantages de ce type d'outil est de permettre une recherche efficace de la/des solution(s) de compromis dans l'espace de conception. Cependant, compte tenu de la complexité du système à concevoir, du nombre de phénomènes à modéliser et de la quantité d'informations à collecter, la construction de ce type d'outil n'est pas une tâche aisée.

1.2.1. Existence d'incertitudes et d'imprécisions

La principale limite de la stratégie de conception mise en œuvre dans cette étude est que pour construire l'outil d'aide à la conception, le travail expérimental s'est focalisé sur un seul niveau fonctionnel (alors que l'UMT en compte 3), une seule opération unitaire (alors que l'UMT en compte 12), un seul produit fini (alors que l'UMT en compte 4) et un seul indicateur de performance (alors que l'UMT en compte 14). Par conséquent, l'outil utilisé pour concevoir l'UMT contient de multiples sources d'imprécision et d'incertitude:

- 1) Concernant la modélisation du fonctionnement de la MPU, le travail expérimental mené sur le gombo a permis de construire un modèle assez précis, au niveau de l'opération unitaire, pour prédire la qualité restante moyenne dans la purée de gombo en fonction de plusieurs variables de conception (format d'emballage, valeur stérilisatrice cible, température de stérilisation et caractéristiques de l'autoclave). Par contre, comme la modélisation des autres opérations unitaires s'est surtout fondée sur des hypothèses et sur les caractéristiques nominales des équipements (cf partie 1 de l'Annexe n°1),

les modèles correspondant contiennent des incertitudes et des imprécisions. De plus, comme la construction du simulateur du procédé est essentiellement fondée sur des hypothèses (cf partie 2 de l'Annexe n°1) et sur les résultats des modèles d'opérations unitaires, les résultats qu'il génère contiennent également une part d'incertitudes et d'imprécisions. Au niveau atelier, la modélisation des performances économiques de la MPU s'est fondée sur le grand nombre de données économiques collectées par AS FOOD INTERNATIONAL en Côte d'Ivoire (cf partie 3 de l'Annexe n°1). Cependant, il est possible que les incertitudes propagées depuis les niveaux inférieurs (opération unitaire et procédé) engendrent également des incertitudes et des imprécisions à ce niveau.

- 2) Concernant la modélisation des préférences, un travail expérimental a été réalisé pour identifier les poids à attribuer aux 5 objectifs de conception lors de l'agrégation des ODI_o^p en PDI_{AHP}^p (cf. partie 2.3.2 du Chapitre 6). Par contre, la plupart des fonctions de désirabilité a été paramétrée à partir d'hypothèses fondées sur le « dire d'expert » (cf. Tableau 19). Mais, compte tenu de la faiblesse du niveau d'expertise existant pour certains indicateurs de performance et certains produits finis, on peut s'interroger sur la validité de certains seuils. C'est par exemple le cas des seuils de désirabilité définis pour la purée de gombo et pour les indicateurs \overline{Q}_f (qualité moyenne restante dans le produit fini) et t_{prep} (temps pour préparer un lot de produit): les hypothèses utilisées pour les définir ne sont pas fondées sur un travail empirique. Comme ce produit et ces 2 fonctions de services sont les plus difficiles à satisfaire (cf. Figure 31), un travail expérimental devrait être réalisé pour valider expérimentalement ces seuils et/ou identifier des valeurs plus adaptées (cf partie 3. de l'Annexe n°3).

Aussi, la robustesse et la fiabilité des résultats fournis par le simulateur global aurait pu être évaluée. Des méthodes comme la Robust Design Optimisation (Allen *et al.*, 2006; Bertsimas *et al.*, 2010; Nemirovski, 2019; Quirante, 2012) ou la Reliability-Based Design Optimisation (Dawei *et al.*, 2021) auraient pu être mises en œuvre pour atténuer les effets des incertitudes sur la décision de conception (Panchal *et al.*, 2013; Schuëller & Jensen, 2008). Mais compte tenu du nombre d'inputs et d'outputs du modèle de simulation et de son caractère multi-échelle, la propagation des incertitudes dans l'outil d'aide à la conception aurait induit un temps de calcul très important peu compatible avec une démarche d'optimisation.

Cependant, malgré l'existence d'incertitudes et d'imprécisions dans l'outil, la visualisation et l'analyse des résultats a montré que la solution obtenue constituait un compromis satisfaisant, faisable et cohérent. L'un des intérêts du travail réalisé est qu'il a permis de bien clarifier le problème de conception et d'en comprendre les tenants et les aboutissants. Surtout, la stratégie de conception mise en œuvre pour optimiser la conception architecturale de l'UMT a permis d'obtenir une solution de compromis satisfaisante et cohérente. En effet, suite à cette étude, la pertinence et la cohérence des équipements retenus a été validée par le bureau d'étude chargé de la conception détaillée de l'UMT. Les différentes configurations de l'UMT ont été implantées dans le container et un dossier de fabrication a été livré pour qu'AS FOOD INTERNATIONAL puisse construire un prototype.

1.2.2. Coût et efficacité de la stratégie de conception

L'analyse et la visualisation des résultats a permis d'identifier les variables de conception, les modèles et les hypothèses sur lesquels le travail expérimental devait se focaliser en priorité afin de mesurer et/ou identifier et/ou vérifier la valeur de certains de leurs paramètres (cf partie 3. de l'Annexe n°3). Mais étant donné le contexte de l'étude et l'importance du temps ayant été consacré au gombo, les expérimentations supplémentaires nécessaires n'ont pu être

mises en œuvre. Rétrospectivement, on peut donc se demander s'il n'aurait pas été plus efficient de consacrer moins de ressources au travail expérimental sur le gombo. Cela aurait permis de libérer du temps pour réaliser certaines expérimentations et améliorer la modélisation d'autres produits finis, d'autres opérations unitaires et d'autres niveaux fonctionnels. De plus, l'analyse des résultats de l'étude de cas montre que le gombo est un produit limitant et qu'il est difficile de trouver une solution de conception qui garantisse une qualité acceptable pour ce produit. Il semble donc que le temps qui a été consacré à ce produit ait été très supérieur à son utilité pour la décision de conception.

Ces limites suggèrent que si le contexte de l'étude (*cf.* début de ce Chapitre) avait été plus clair, la stratégie de conception adoptée pour concevoir l'UMT aurait pu être plus efficiente. En termes de stratégie de conception, pour éviter d'allouer trop de ressources à certains modèles peu utiles pour la décision de conception et de ne pas en allouer assez aux modèles les plus utiles, trois recommandations méthodologiques peuvent être tirées de ce travail :

- 1) Le problème de conception doit être clarifié avant d'engager un travail expérimental et construire l'outil d'aide à la décision. En effet, en raison du contexte de cette étude, nous avons considéré qu'une meilleure connaissance du gombo était un prérequis nécessaire à la conception de l'UMT. Par conséquent, le travail expérimental sur ce produit a été engagé avant que le problème de conception de l'UMT soit clarifié. Les résultats de cette étude suggèrent qu'en terme de méthodologie de conception, il aurait probablement été plus efficient de commencer par clarifier le problème de conception (étape 1 de MIMMODS).
- 2) L'outil d'aide à la décision doit d'abord être construit avec des modèles approximatifs puis progressivement amélioré avec des données expérimentales. En raison de la stratégie de conception qui a été choisie, le travail expérimental sur le gombo a été réalisé avant qu'une première version de l'outil n'ait été implémentée. Mais en terme de méthodologie de conception, il aurait probablement été plus efficient de commencer par développer l'outil à partir d'hypothèses (à la manière de ce qui a été fait pour construire les modèles d'opérations unitaire et du procédé). Ce n'est que dans un second temps qu'un travail expérimental aurait dû être mené pour améliorer les modèles contenus dans l'outil de façon itérative et en tenant compte du rapport entre leur utilité pour la décision de conception et du coût de leur mise en œuvre. Cette manière de faire est en accord avec les recommandations de (Ingram *et al.*, 2004; Trystram, 2012) pour qui le travail expérimental visant à identifier les paramètres d'un modèle ne doit être mené qu'après avoir (i) défini la structure du modèle et (ii) construit une première version du modèle à partir de données disponibles et d'hypothèses.
- 3) Les niveaux fonctionnels de l'atelier doivent être modélisés de façon descendante (top-down) plutôt qu'ascendante (bottom-up). En effet, parmi les différentes stratégies possibles pour construire un modèle multi-échelle (Ingram *et al.*, 2004), celle mise en œuvre dans cette étude était « bottom-up » : un modèle a été développé pour décrire le niveau et l'échelle les plus bas, puis des modèles à des niveaux et des échelles croissantes ont été construits à tour de rôle. Cette stratégie suppose que comme les niveaux/échelles inférieurs (l'opération unitaire) déterminent les propriétés recherchées pour le produit fini (sa qualité), la conception du système (l'UMT) découle directement des niveaux/échelles inférieurs. Mais dans le cas de l'UMT (*cf.* Tableau 18), l'objectif correspondant au niveau supérieur (la viabilité économique) est plus important que l'objectif correspondant au niveau inférieur (la qualité des produits finis). Surtout, d'après Ingram *et al.* (2004), cette approche n'est pas adaptée car les méthodes et les outils permettant de construire des modèles « bottom-up » de façon efficiente sont manquants et car les phénomènes se produisant aux niveaux/échelles inférieurs peuvent être mal connus. D'après Ingram *et al.* (2004), la stratégie « top-

down » est la plus efficace et la plus adaptée aux contraintes de temps et de coût inhérentes à la conception d'un atelier de transformation. Cette approche consiste à commencer par construire un modèle au niveau/échelle supérieur, puis à l'améliorer en ajoutant successivement des modèles au niveau/échelle inférieur jusqu'à ce que les objectifs de précision et d'exactitude soient atteints. Cette stratégie « top-down » est cohérente avec les recommandations de Panchal *et al.* (2005) et avec l'amélioration itérative de l'outil d'aide à la conception proposée dans MIMMODS (Etape 7 de la méthodologie).

Le coût de la stratégie de conception de l'UMT interroge sur l'applicabilité de ce type de stratégie hors du monde de la recherche. En effet, par rapport aux démarches plus directes, plus rapides et moins complexes que les bureaux d'études utilisent couramment pour concevoir des ateliers de transformation, la stratégie de conception mise en œuvre pour concevoir l'UMT a été longue et coûteuse. Le contexte de cette étude et le fait qu'elle ait été réalisée dans un cadre de recherche scientifique expliquent ce surcoût.

Cependant, ce travail de recherche a démontré le potentiel de la méthodologie utilisée pour répondre à des problèmes de conception multi-échelle et multi-objectifs. En effet, ces problèmes sont complexes à résoudre sans outil d'aide à la conception. L'un des avantages du type d'outil utilisé dans cette étude est qu'il est réutilisable et qu'il peut être adapté pour résoudre différents problèmes de conception.

Afin de faciliter l'utilisation d'outil d'aide à la conception par des acteurs impliqués dans la conception d'ateliers de transformation, il paraissait donc nécessaire de formaliser une méthodologie globale de conception d'ateliers de transformation et d'illustrer comment elle pouvait être mise en œuvre.

2. Apports méthodologiques et applications possibles de MIMMODS

2.1. Principaux apports méthodologiques proposés

A partir de la bibliographie existante et de l'expérience acquise pendant la conception de l'UMT, la « Methodology for the Integrated, Multi-scale and Multi-Objective Design of Systems » (MIMMODS) a été formalisée dans le chapitre 5 et illustrée dans le chapitre 6. MIMMODS répond au besoin d'une méthodologie de conception holistique adaptée au génie des procédés alimentaires (voir Madoumier *et al.*, 2019) et se veut aussi reproductible et générique que possible. Elle constitue donc l'un des principaux apports de cette étude. Par rapport à la méthodologie OIA, qui a été appliquée dans les thèses de Quirante (2012), Raffray (2014) et Rivier, (2017), les briques méthodologiques qui ont été ajoutées offrent plusieurs avantages:

- 1) La décomposition hiérarchique du système à concevoir et le recours aux méthodes de couplages multi-échelles facilitent la modélisation et la simulation du comportement de l'atelier de transformation et permettent de prendre en compte des variables et des objectifs de conception nombreux, variés et correspondant à différents niveaux fonctionnels (étape 2 de MIMMODS),
- 2) La visualisation des résultats (étape 6 de MIMMODS) permet au concepteur et au décideur d'améliorer leur compréhension du problème de conception et d'identifier certaines améliorations possibles,
- 3) La priorisation des améliorations possibles pendant l'amélioration itérative de l'outil d'aide (étape 7 de MIMMODS) permet d'allouer de façon efficace les ressources disponibles.

La décomposition hiérarchique de systèmes complexes est une méthode couramment utilisée en Génie Industriel (e.g. Leung Pah Hang et al., 2016; Liu et al., 2016; Sinha et al., 2013; Yang & Marquardt, 2009). Dans l'étude de cas, cette méthode a facilité la construction d'un simulateur adapté (i) à la complexité de l'UMT, (ii) à la diversité et au nombre de variables de conception et (iii) au grand nombre d'indicateurs de performance. Les concepts, les outils et les méthodes de la modélisation multi-échelle complètent cette représentation systémique (Yang & Marquardt, 2009). En effet, ils facilitent la modélisation des flux (de matière, d'énergie, de valeur, d'information...) et des interactions entre des systèmes ayant des échelles caractéristiques différentes (couplage vertical). Jusqu'à présent, en génie des procédés alimentaires, la méthodologie OIA n'avait été utilisée qu'à un seul niveau fonctionnel (l'opération unitaire) pour concevoir des équipements de transformation alimentaire (Quirante, 2012; Raffray, 2014; Rivier, 2017). L'ajout des méthodes de décomposition hiérarchique de système complexe et de couplage multi-échelle permettent d'appliquer les méthodes d'optimisation multi-objectif à la conception de systèmes complexes composés de plusieurs niveaux fonctionnels (comme un atelier de transformation).

L'étape de visualisation des résultats est une étape importante qui permet de valider que la solution de conception obtenue est satisfaisante, cohérente et faisable et donc de décider si la décision de conception peut être prise ou si des améliorations de l'outil d'aide à la conception sont nécessaires. Elle répond directement au besoin identifié par Afandi (2020) et Rivier (2017) pour qui la représentation graphique des résultats facilite la compréhension de l'espace de conception par le concepteur et le décideur ainsi que la prise en main de l'outil. De plus, He & Yen (2016) et Tusar & Filipic (2015) insistent sur l'intérêt d'utiliser les méthodes de visualisation lorsque des algorithmes évolutionnaires d'optimisation multi-objectif sont utilisés (comme le NSGA-II dans l'étude de cas) car elles permettent d'évaluer la qualité du front de Pareto approximé, d'évaluer les conflits et les compromis entre les objectifs et facilitent la sélection d'une solution de compromis. Les différentes méthodes de visualisation des résultats utilisées dans l'étude de cas (cf. partie 3 du Chapitre 6) fournissent un exemple de la façon avec laquelle elles peuvent être utilisées. Pendant le processus d'optimisation, elles ont permis de mieux comprendre le problème de conception et la nature des compromis induits par les modèles de préférence. Pendant le processus itératif d'amélioration de l'outil, elles ont permis d'identifier : (i) les produits finis, les objectifs de conception et les fonctions de service qui ont le plus contraint l'algorithme pendant l'exploration de l'espace de conception, et (ii) les variables de conception, les modèles et les hypothèses à améliorer, vérifier et/ou identifier expérimentalement.

La conception est un processus qui nécessite de nombreuses itérations (Messer *et al.*, 2011; Ming *et al.*, 2021; Panchal *et al.*, 2008). Cependant, dans la méthode OIA (Madoumier *et al.*, 2019; Raffray, 2014; Rivier, 2017), la stratégie pour mener ces itérations n'est pas clairement précisée. Les itérations sont un moyen d'accroître l'efficacité du processus de conception (c'est-à-dire d'aboutir à la meilleure conception le plus rapidement possible): au lieu de développer tous les modèles de simulation jusqu'à leur achèvement, puis de lancer le processus de conception de manière séquentielle, le développement de l'outil et son utilisation pour explorer l'espace de conception doivent être menés en parallèle. Pour cela, des modèles approximatifs doivent d'abord être utilisés, puis affinés au fur et à mesure des itérations (Panchal *et al.*, 2013, 2005). Mais pendant cette démarche, comme plusieurs paramètres sont incertains, des informations supplémentaires doivent être collectées (grâce à des expériences et/ou des simulations informatiques pour mesurer et/ou identifier des paramètres par exemple) pour réduire l'incertitude associée à la prise de décision et arriver à une meilleure décision. Cela entraîne une augmentation du coût du processus de conception (temps humain, temps de calcul et/ou retard) (Ming *et al.*, 2021). Par conséquent, comme les ressources disponibles pour améliorer la qualité de l'outil sont souvent limitées, elles donc doivent être allouées

stratégiquement. Mais la difficulté est alors de choisir quelles améliorations mettre en œuvre. En effet, dans un modèle de simulation multi-échelle, comme les incertitudes se propagent à travers les modèles et entre les niveaux de simulation, il est très difficile de quantifier l'impact de sources d'incertitudes spécifiques sur l'incertitude globale des résultats, et sur la décision de conception (Liu *et al.*, 2016; Ming *et al.*, 2021; Panchal *et al.*, 2013). Aussi, dans MIMMODS, pour savoir si les informations utilisées pour construire l'outil sont suffisantes pour prendre une décision de conception ou si des efforts supplémentaires doivent être déployés pour améliorer l'outil, nous avons proposé de s'appuyer sur l'analyse et la visualisation des résultats. De plus, pour que l'amélioration de l'outil soit efficiente, les améliorations possibles doivent être priorisées en tenant compte du rapport entre leur coût (données expérimentales ; temps d'implémentation et/ou temps de simulation/optimisation supplémentaire) et leur utilité potentielle pour la décision de conception. Dans l'étude de cas, le coût et l'utilité potentielle des améliorations possibles a été estimé de façon simple et subjective grâce à une échelle allant de 1 à 5 (*cf.* partie 3. de l'Annexe n°3). Toutefois, dans la littérature, beaucoup de méthodes basées sur la valeur de l'information ont été développées et peuvent être utilisées pour prioriser les améliorations à effectuer (*e.g.* Messer *et al.*, 2011; Ming *et al.*, 2021; Panchal *et al.*, 2008).

2.2. Souplesse, généricité et applications possibles de MIMMODS

Le cadre conceptuel et méthodologique de MIMMODS permet de surmonter la complexité du problème de conception en aidant le concepteur : (i) à bien clarifier et formaliser le problème de conception et (ii) à construire et utiliser un outil d'aide à la conception pour résoudre ce problème. De plus, la façon avec laquelle MIMMODS a été mise en œuvre dans l'étude de cas montre que ce cadre méthodologique offre beaucoup de degrés de libertés.

Tout d'abord, l'étude de cas montre que MIMMODS permet de prendre en compte les objectifs et les contraintes de conception de multiples manières. L'analyse fonctionnelle a permis d'identifier les fonctions de services et les indicateurs de performance à associer à chaque objectif/contrainte de conception pour 5 des 8 objectifs de conception (*cf.* Tableau 18). Comme aucun indicateur de performance adapté et calculable n'a été identifié pour les objectifs « mobilité », « flexibilité des produits finis » et « assemblage et maintenabilité locale », ils ont été pris en compte de différentes façons:

- Pour intégrer l'objectif « mobilité » au problème de conception, dans le scénario d'utilisation, nous avons fixé comme contrainte que l'UMT devait (i) tenir dans un conteneur pour pouvoir être déplacée sur un semi-remorque et (ii) être suffisamment légère pour être soulevée/abaissée par un système de levage. Dans l'outil, la solution de conception était considérée comme infaisable si l'encombrement et/ou le poids des équipements n'était pas compatible avec les dimensions du container et/ou avec la capacité du système de levage (*cf.* partie 2.2.2.2 du Chapitre 6).
- Pour intégrer l'objectif « flexibilité des produits finis » au problème de conception, 3 matières premières et 4 produits finis ont été définis dans le scénario d'utilisation. De plus, les recettes correspondantes (*cf.* Figure 26) ont été choisies pour minimiser le nombre d'équipements nécessaires et maximiser la polyvalence de l'UMT. Pour implémenter la contrainte de polyvalence dans l'outil, un test de faisabilité déterminait si les équipements contenus dans une solution de conception permettaient de réaliser une recette pour chacun des produits finis. De plus, tous les indicateurs de performances et les indices de désirabilité (à part le GDI_{AHP}) étaient calculés pour chaque produit fini : la pondération des 4 produits finis lors de l'agrégation des 4 PDI_{AHP}^p en 1 GDI_{AHP} (*cf.* eq. 15 de la partie 2.3.2 du Chapitre 6) a permis de rechercher la solution polyvalente qui était globalement la plus satisfaisante.

- L'objectif « assemblage et maintenabilité locale » a été pris en compte lors de la recherche et de la définition des équipements possibles pour les variables de conception « modèle d'équipement » (cf. partie 2.1.3 du Chapitre 6). Par exemple, les types d'équipements disposant de pièces fragiles (e.g. presses à bandes) ont été écartés et les modèles d'équipements disposant de systèmes de contrôle-commande électromécaniques étaient préférés à ceux disposant de systèmes électroniques et/ou numériques.

Par ailleurs, l'étude de cas a montré et illustré comment différents types de variables de conception pouvaient être prises en compte :

- Pour définir les modalités possibles pour les variables « modèle d'équipement », des équipements réels ont été utilisés. Cela se justifiait par le fait que le problème de conception est un cas réel et que l'UMT a vocation à être construite. Mais le travail conduit auprès des équipementiers européens pour collecter toutes les caractéristiques techniques nécessaires à la modélisation (fonctions disponibles, capacité, dimensions, poids, contrôle commandes, prix etc) a été fastidieux. Une autre façon de faire aurait été de modéliser le coût des différents types d'équipements en fonction de leur capacité et de certaines de leurs caractéristiques techniques. Par exemple, ce type de méthode est proposé par Cognart *et al.*, (2002) pour évaluer les coûts de construction, de fonctionnement et de maintenance de systèmes d'agitation mélange.
- Pour prendre en compte les interactions potentielles entre la structure de l'UMT et la façon avec laquelle elle serait gérée et pilotée par son utilisateur, 3 autres types de variables ont été ajoutées au problème de conception. D'une part, 2 variables « condition opératoire » (température de la pasteurisation/stérilisation et valeur pasteurisatrice/stérilisatrice) et 1 variable « produit » (format de l'emballage) ont été retenues car leur interaction potentielle avec le type d'autoclave pouvait avoir un effet sur plusieurs objectifs de conception (qualité du produit fini et viabilité économique) et donc influencer la décision de conception. D'autre part, 2 variables liées aux ressources de production (nombre d'opérateurs dans l'équipe affectée au lavage, tri et parage et dans l'équipe affectée à l'extraction et l'homogénéisation ; cf. partie 2.1.3 du Chapitre 6), ont été intégrées au problème de conception car leur valeur ne pouvait être définie avant de connaître la structure et la capacité de l'UMT et car elles avaient également un effet potentiel sur les performances de l'UMT (capacité de production, espace au sol nécessaire et viabilité économique notamment) et pouvaient donc influencer la décision de conception. Les travaux de Koller & Ricardez-Sandoval, (2017), Raffray (2014) et Rivier (2017) fournissent des exemples d'autres variables de structure et de pilotage pouvant être prises en compte dans un problème de conception. Comme précisé dans la méthodologie (cf. partie 2.2.3 du Chapitre 5), des variables de conception liées à l'organisation de la production peuvent également être prises en compte.

Enfin, la façon avec laquelle les préférences ont été modélisées puis prises en compte pendant le processus d'optimisation de l'étude de cas montre que MIMMODS permet de prendre en compte les préférences du décideur/des utilisateurs de différentes façons et à différentes étapes du processus d'optimisation :

- Concernant la modélisation des préférences, la pondération de ces 5 objectifs pour calculer les PDI_{AHP}^p (cf. eq. 14) a permis de prioriser les objectifs en fonction de leur importance relative pour le décideur et les utilisateurs. De plus, le paramétrage des fonctions de désirabilité a permis d'intégrer au problème de conception : (i) le niveau idéal que devrait atteindre chaque indicateur de performance pour que la fonction

correspondante soit complètement satisfaite et (ii) les valeurs limites en deçà desquelles la fonction recherchée n'est pas du tout satisfaite.

- Concernant l'intégration des préférences dans le processus d'optimisation, l'étude de cas montre que MIMMODS permet d'intégrer les préférences :
 - o *a priori* : pendant la phase de recherche, l'agrégation minimale a été utilisée pour que le NSGA-II explore l'espace de recherche de façon à améliorer le degré de satisfaction de la fonction de service la moins bien satisfaite (pour chacun des 4 produits finis).
 - o *a posteriori* : après la phase de recherche, l'utilisation de la méthode d'agrégation pondérée a permis de classer les solutions non-dominées en prenant en compte l'importance relative des objectifs de conception.
 - o de façon interactive : pendant le processus itératif d'amélioration de l'outil d'aide à la conception, les préférences (poids attribué aux objectifs et seuils de désirabilité) ont été modifiés à mesure que les multiples itérations permettaient une meilleure compréhension du problème de conception.

Du fait de la souplesse de la méthodologie et de sa généralité, on peut imaginer qu'elle puisse être appliquée à d'autres types de problèmes de conception. Par exemple, en reprenant l'architecture de l'outil mis au point pour concevoir l'UMT (cf. Figure 24), MIMMODS pourrait être utilisée pour :

- 1) Rechercher la structure d'atelier, la recette et/ou le produit fini permettant la meilleure rentabilité dans un contexte donné et à partir d'une matière première spécifique. Ainsi, dans l'étude de cas, 2 produits finis étaient possibles pour la mangue. L'analyse des performances économiques de l'UMT a montré qu'il est plus rentable de transformer la mangue en purée qu'en nectar (cf. partie 3.2.1 du Chapitre 6). D'autres types de produits finis (mangue séchée, confiture de mangue), d'autres types d'équipements (séchoir, boule de concentration) et d'autres recettes auraient pu être pris en compte pour rechercher comment valoriser au mieux ce fruit dans le contexte ivoirien.
- 2) Remodeler un atelier de transformation existant et chercher comment modifier sa structure et/ou ses recettes et/ou son pilotage de façon à améliorer ses performances.
- 3) Développer un outil d'aide à la décision adapté à l'optimisation de la gestion et du pilotage d'un atelier de transformation.

Conclusion générale et perspectives de recherche

Conclusion Générale et perspectives de recherche

L'objectif de ce travail était de concevoir, pour la société AS FOOD INTERNATIONAL, une unité mobile de transformation (UMT) capable de transformer et stabiliser différents types de fruits et légumes (mangue, ananas, gombo) en purées et/ou en jus. La conception de cette UMT était un problème de conception multi-objectif et multi-échelle complexe qui a nécessité la mise en place d'une méthodologie adaptée. En effet, l'UMT est un système complexe composé de plusieurs niveaux fonctionnels au sein desquels les phénomènes qui se produisent présentent des échelles de temps caractéristiques différentes.

Le gombo faisait partie des trois fruits et légumes que l'UMT devait pouvoir transformer et stabiliser thermiquement. Bien que les propriétés gluantes de ce légume soient très appréciées des consommateurs africains, l'évolution de cet indicateur de qualité au cours du procédé était mal connue. L'étude de la texture gluante du gombo a donc constitué la première partie de ce travail. L'objectif était (i) d'identifier comment mesurer ses propriétés rhéologiques et texturales et (ii) de rechercher les méthodes de mesure instrumentale les plus adaptées pour prédire la perception sensorielle de la texture gluante. Les résultats ont montré que les suspensions gluantes préparées à base de gombo sont des fluides structurés qui présentent des propriétés viscoélastiques, rhéofluidifiantes, adhésives, filantes, ductiles et cohésives. Parmi les mesures instrumentales permettant de mesurer leurs propriétés rhéologiques et texturales, l'indice de consistance K et l'indice d'écoulement n sont bien corrélés avec leurs propriétés visqueuses, viscoélastiques et adhésives. De plus, la mesure instrumentale du filant est bien corrélée avec leurs propriétés élongationnelles, cohésives et ductiles. Ces deux ensembles de mesures instrumentales sont suffisants pour caractériser les propriétés rhéologiques et texturales de ces suspensions et nécessaires pour les discriminer en fonction du procédé et de la formulation avec lesquels elles ont été préparées. Une analyse sensorielle descriptive quantitative a confirmé la pertinence de ces mesures pour prédire la perception sensorielle de la texture de sauces gombo. En particulier, il est possible de prédire le niveau de gluant à partir de la mesure instrumentale du filant. Les résultats ont également montré que la texture gluante est « une propriété texturale complexe résultant de la perception subjective et combinée des propriétés élongationnelles et visqueuses de matrices semi-solides ».

Les mesures instrumentales de l'indice de consistance K et du filant ont ensuite été utilisées pour suivre la dégradation de la qualité texturale du gombo au cours du traitement thermique. L'analyse des paramètres cinétiques identifiés a montré que l'augmentation de la température de traitement entraîne une accélération de la vitesse de dégradation des propriétés texturales du gombo. Quels que soient la température et le pH, les propriétés élongationnelles des purées de gombo se dégradent plus vite que leurs propriétés visqueuses. Alors que le pH des purées n'a pas d'effet sur la vitesse de dégradation de leur consistance, la dégradation de leurs propriétés filantes est moins rapide à pH 7 qu'à pH 5. Ces résultats montrent que pour préserver au mieux les propriétés gluantes des purées de gombo, il est préférable de les alcaliniser avant de les stabiliser thermiquement.

Les paramètres cinétiques permettant de décrire la dégradation du filant à pH 7 ont ensuite été utilisés pour construire un modèle capable de prédire la qualité texturale finale des purées de gombo en fonction des conditions opératoires du traitement thermique. Un modèle similaire a été construit pour prédire la qualité finale des trois autres produits finis de l'UMT.

Dans un second temps, pour optimiser la conception de l'UMT d'AS FOOD INTERNATIONAL, un outil d'aide à la conception a été développé. Pour cela, le scénario d'utilisation, les variables de conception, et les objectifs de conception de l'UMT ont tout d'abord été définis. Puis, un simulateur capable d'estimer les performances de l'UMT en fonction des variables de conception a été développé. Pour construire ce simulateur, l'UMT a

été représentée comme un système hiérarchique composé de 3 niveaux fonctionnels (opération unitaire, procédé et atelier). Les modèles prédictifs de la qualité des produits finis ont été intégrés à ce simulateur au niveau de l'opération unitaire.

Ensuite, les préférences du décideur et des utilisateurs ont été modélisées afin de traduire les valeurs des indicateurs de performance en indices de désirabilité. Puis, un algorithme d'optimisation a été intégré pour rechercher les solutions non-dominées contenues dans l'espace de conception. Enfin, les indices de désirabilité ont été utilisés pour classer ces solutions et identifier la plus satisfaisante d'entre elles.

Après avoir implémenté l'outil d'aide à la décision, il a été utilisé et amélioré de façon itérative. Pour cela, les résultats qu'il générait étaient visualisés et analysés à la fin de chaque itération. Cela a permis de mieux comprendre quels étaient les variables de conception, les modèles et les hypothèses dont dépendaient le plus la décision de conception et qu'il fallait donc en priorité améliorer, vérifier et/ou identifier expérimentalement.

La démarche mise en œuvre pour optimiser la conception architecturale de l'UMT a conduit à une solution de compromis satisfaisante. La pertinence et la cohérence des équipements retenus a été validée par le bureau d'étude chargé de la conception détaillée de l'UMT. Les différentes configurations de l'UMT ont été implantées dans le container et un dossier de fabrication a été livré pour qu'AS FOOD INTERNATIONAL puisse construire un prototype.

A partir de la bibliographie existante et de l'expérience acquise pendant la conception de l'UMT, la « Methodology for the Integrated, Multi-scale and Multi-Objective Design of Systems » (MIMMODS) a été formalisée. Cette méthodologie de conception reproductible et générique est adaptée au génie des procédés alimentaires et constitue donc l'un des principaux apports de cette étude. Le recul pris sur le travail montre que pour que le processus de conception soit efficient, MIMMODS doit être mise en œuvre de façon itérative : pour construire l'outil d'aide à la conception, des modèles approximatifs doivent d'abord être utilisés, puis être affinés au fur et à mesure des itérations. Pendant ces itérations, pour allouer de façon efficiente les ressources disponibles, les améliorations possibles doivent être priorisées en tenant compte du rapport entre leur coût et leur utilité potentielle pour la décision de conception. De plus, contrairement à ce qui a été réalisé dans cette étude, il est préférable de construire le simulateur en suivant une stratégie de modélisation « top-down » : les modèles doivent tout d'abord être développés au niveau et à l'échelle supérieurs. Puis le simulateur doit être amélioré en ajoutant successivement des modèles aux niveaux et aux échelles inférieurs, jusqu'à ce que les objectifs de précision et d'exactitude de l'outil d'aide à la décision soient atteints.

Les résultats du travail mené sur le gombo et la mesure instrumentale de la texture gluante ouvrent plusieurs perspectives de recherche :

- Les deux méthodes instrumentales qui permettent de mesurer la texture gluante du gombo pourraient être utilisées pour suivre l'évolution de la texture du gombo pendant d'autres procédés et/ou pour d'autres ingrédients gluants. Par exemple, compte tenu de l'importance du gombo séché dans les habitudes de consommation ivoirienne, elles pourraient être utilisées pour suivre et modéliser l'évolution des propriétés gluantes du gombo au cours de son séchage, afin d'en améliorer la qualité. Ces deux mesures pourraient également être utilisées pour rechercher des voies de transformation d'autres ingrédients ayant des propriétés gluantes comme les amandes du fruit d'*Irvingia gabonensis*, l'écorce de *Triumfetta cordifolia* et les feuilles d'*Adansonia digitata* et de *Corchorus olitorius*. Elles pourraient également être utilisées dans le cadre de programmes de sélection variétale de ces espèces végétales.

- Pour identifier les leviers qui permettraient de diminuer l'effet du procédé de conservation sur les propriétés rhéologiques et texturales du gombo, un travail complémentaire pourrait être mené sur les pectines de gombo. En particulier, leur dépolymérisation sous l'effet de la chaleur peut être à l'origine de la perte de texture engendrée par la stabilisation thermique. Il serait donc intéressant d'étudier quels sont les mécanismes biochimiques qui sont impliqués dans ces dégradations afin de mieux comprendre l'origine des modifications rhéologiques et texturales des suspensions gluantes.
- Pour compléter le travail mené sur la texture gluante, une analyse sensorielle auprès des consommateurs africains serait nécessaire pour déterminer (i) quel est le niveau de consistance et de filant que devrait présenter une sauce gluante pour que sa qualité texturale soit maximale et (ii) les valeurs limites en deçà (ou au-delà) desquelles sa qualité texturale n'est pas acceptable.

En ce qui concerne la méthodologie de conception intégrée, multi-objectif et multi-échelle qui a été formalisée et mise en œuvre, cette étude ouvre plusieurs perspectives de recherche.

D'une part, MIMMODS pourrait être utilisée pour résoudre d'autres problèmes de conception. Par exemple, l'architecture de l'outil d'aide à la décision mis au point pour concevoir l'UMT pourrait être utilisée pour (i) concevoir d'autres ateliers de transformation, (ii) remodeler des ateliers existants et/ou (iii) développer un outil d'aide à la décision permettant d'optimiser la gestion et le pilotage d'un atelier de transformation.

D'autre part, le travail méthodologique doit être poursuivi afin de définir (i) quand et comment utiliser les méthodes d'analyse de sensibilité, de « Reliability-Based Design Optimisation » et/ou de « Robust Design Optimisation » et (ii) dans quelles conditions l'utilisation de ces méthodes permet d'améliorer la qualité et l'efficacité du processus de conception. En effet, compte tenu de la complexité de l'outil d'aide à la décision à mettre en place dans MIMMODS, la question du rapport coût/bénéfice de ces méthodes reste entière.

Références bibliographiques

Références bibliographiques liées au gombo

- Abimbola M Enitan. (2011). Food processing optimization using evolutionary algorithms. *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY*, 10(72). <https://doi.org/10.5897/AJB11.410>
- Affognon, H., Mutungi, C., Sanginga, P., & Borgemeister, C. (2015). Unpacking Postharvest Losses in Sub-Saharan Africa: A Meta-Analysis. *World Development*, 66, 49–68. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.08.002>
- AFNOR. (2009). *Norme Française Analyse Sensorielle Vocabulaire NF ISO 5492*. Association Française de Normalisation (AFNOR).
- Alba, K., Bingham, R. J., & Kontogiorgos, V. (2017). Mesoscopic structure of pectin in solution: *Biopolymers*, 107, 1–8. doi:10.1002/bip.23016
- Alba, K., Kasapis, S., & Kontogiorgos, V. (2015). Influence of pH on mechanical relaxations in high solids LM-pectin preparations. *Carbohydrate Polymers*, 127, 182–188. doi:10.1016/j.carbpol.2015.03.051
- Alba, K., Laws, A. P., & Kontogiorgos, V. (2015). Isolation and characterization of acetylated LM-pectins extracted from okra pods. *Food Hydrocolloids*, 43, 726–735. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.003>
- Alba, K., Ritzoulis, C., Georgiadis, N., & Kontogiorgos, V. (2013). Okra extracts as emulsifiers for acidic emulsions. *Food Research International*, 54, 1730–1737. doi:10.1016/j.foodres.2013.09.051
- Alba, K., Sagis, L. M. C., & Kontogiorgos, V. (2016). Engineering of acidic O/W emulsions with pectin. 145, 301–308.
- Assi, O., Konan, Y., Coulibaly, A., Sidibe, D., Deigna-Mockey, V., Mahan, R., & Biego, H. (2017). Sensory Analysis of Dishes Based on Mucilages of *Abelmoschus esculentus*, *Beilschmiedia mannii*, *Corchorus olitorius* and *Irvingia gabonensis* from Côte d'Ivoire. *International Journal of Biochemistry Research & Review*, 16, 1–11. <https://doi.org/10.9734/IJBCRR/2017/32379>
- Avallone, S., Bohuon, P., Hemery, Y., & Treche, S. (2007). Improvement of the in vitro Digestible Iron and Zinc Content of Okra (*Hibiscus esculentus* L.) Sauce Widely Consumed in Sahelian Africa. *Journal of Food Science*, 72(2), S153–S158. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00280.x>
- Aworh, O. C., Olorunda, A. O., & Akibo, O. (1980). Quality attributes of frozen okra as influenced by processing and storage. *International Journal of Food Science & Technology*, 15, 429–433. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb00959.x>
- Azi, F., Oledinma, N. U., Nwobasi, V. N., & Nwankwegu, A. S. (2017). Effect of Varying Concentrations of Ethanol and Lime Extracts Pre-Treatments on the Aflatoxins and Chemical Quality Characteristics of Stored Irvingia Seeds. *Food Science and Quality Management*, 59, 15p.
- Bedigian, D. (2004). Slimy Leaves and Oily Seeds: Distribution and Use of Wild Relatives of Sesame in Africa. *Economic Botany*, 58(sp1), S3–S33. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)58\[S3:SLAOSD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)58[S3:SLAOSD]2.0.CO;2)
- Bengtsson, H., Hall, C., & Tornberg, E. (2011). Effect of Physicochemical Properties on the Sensory Perception of the Texture of Homogenized Fruit and Vegetable Fiber Suspensions. *Journal of Texture Studies*, 42, 291–299. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2010.00277.x>

Böni, L., Fischer, P., Böcker, L., Kuster, S., & Rühls, P. A. (2016). Hagfish slime and mucin flow properties and their implications for defense. *Scientific Reports*, 6, 1–8. doi:10.1038/srep30371

Bourne, M. C. (2002). *Food texture and viscosity: Concept and measurement* (2nd ed). San Diego: Academic Press.

Brenner, T., Hayakawa, F., Ishihara, S., Tanaka, Y., Nakauma, M., Kohyama, K., ... Nishinari, K. (2014). Linear and Nonlinear Rheology of Mixed Polysaccharide Gels. Pt. II. Extrusion, Compression, Puncture and Extension Tests and Correlation with Sensory Evaluation. *Journal of Texture Studies*, 45, 30–46. doi:10.1111/jtxs.12049

Chen, J., Feng, M., Gonzalez, Y., & Pugnaroni, L. A. (2008). Application of probe tensile method for quantitative characterisation of the stickiness of fluid foods. *Journal of Food Engineering*, 87(2), 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.004>

Corker, A., Ng, H. C.-H., Poole, R. J., & García-Tuñón, E. (2019). 3D printing with 2D colloids: Designing rheology protocols to predict ‘printability’ of soft-materials. *Soft Matter*, 15, 1444–1456. doi:10.1039/C8SM01936C

Dansi, A., Adjatin, A., Adoukonou-Sagbadja, H., Faladé, V., Yedomonhan, H., Odou, D., & Dossou, B. (2008). Traditional leafy vegetables and their use in the Benin Republic. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55, 1239–1256. <https://doi.org/10.1007/s10722-008-9324-z>

Dimopoulou, M., Tsvintzelis, I., Ritzoulis, C., & Panayiotou, C. (2016). Thermodynamics of a food macromolecular assembly: The case of okra mucilage. 6, 20916–20925.

Doehlert, D. H. (1970). Uniform Shell Designs. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 19, 231–239. doi:10.2307/2346327

Duret, S., Hamon, E., Hoang, H.-M., Stahl, V., Derens-Bertheau, E., Delahaye, A., & Laguerre, O. (2020). Modelling methodology of temperature and energy consumption in food plant: Application to puff pastry. *International Journal of Refrigeration*, 115, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.03.009>

Falade, K. O., & Omojola, B. S. (2010). Effect of Processing Methods on Physical, Chemical, Rheological, and Sensory Properties of Okra (*Abelmoschus esculentus*). *Food and Bioprocess Technology*, 3, 387–394. doi:10.1007/s11947-008-0126-2

Fasogbon, B. M., Taiwo, K. A., & Adeniran, H. A. (2017). Sensory profiling of ogbono soup mix and its nutritional characterisation. *Annals of Food Science and Technology*, 18, 552–563.

Feng, C., Jin, S., Luo, M., Wang, W., Xia, X., Zu, Y., Li, L., & Fu, Y. (2015). Optimization of production parameters for preparation of natto-pigeon pea with immobilized *Bacillus natto* and sensory evaluations of the product. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 31, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.08.002>

Freitas, T. K. F. S., Oliveira, V. M., de Souza, M. T. F., Geraldino, H. C. L., Almeida, V. C., Fávaro, S. L., & Garcia, J. C. (2015). Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops and Products*, 76, 538–544. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.027>

Ghori, M. U., Mohammad, M. A., Rudrangi, S. R. S., Fleming, L. T., Merchant, H. A., Smith, A. M., & Conway, B. R. (2017). Impact of purification on physicochemical, surface and functional properties of okra biopolymer. *Food Hydrocolloids*, 71, 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.02.010>

- Gilbert, L., Savary, G., Grisel, M., & Picard, C. (2013). Predicting sensory texture properties of cosmetic emulsions by physical measurements. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 124, 21–31. doi:10.1016/j.chemolab.2013.03.002
- Hadde, E. K., & Chen, J. (2019). Shear and extensional rheological characterization of thickened fluid for dysphagia management. *Journal of Food Engineering*, 245, 18–23. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.10.007
- He, Q., Hort, J., & Wolf, B. (2016). Predicting sensory perceptions of thickened solutions based on rheological analysis. *Food Hydrocolloids*, 61, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.05.010>
- Hincker, C. (2005). Le sec et l'humide. *Études rurales*, 175–176, 183–194. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.8216>
- Holdsworth, S. D. (1971). Applicability of Rheological Models to the Interpretation of Flow and Processing Behaviour of Fluid Food Products. *Journal of Texture Studies*, 2, 393–418. doi:10.1111/j.1745-4603.1971.tb00589.x
- Hyun, K., Kim, S. H., Ahn, K. H., & Lee, S. J. (2002). Large amplitude oscillatory shear as a way to classify the complex fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 107, 51–65. doi:10.1016/S0377-0257(02)00141-6
- Inyang, U. E., & Ike, C. I. (1998). Effect of blanching, dehydration method and temperature on the ascorbic acid, colour, sliminess and other constituents of okra fruit. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 49, 125–130. doi:10.3109/09637489809089392
- J. J. Meister, Anderle, K., & Merriman, G. (1983). Rheology of Aqueous Solutions of Okra Mucilage F. *Journal of Rheology*, 27(1), 37–46.
- Kim, H., Hwang, H.-I., Song, K.-W., & Lee, J. (2017). Sensory and rheological characteristics of thickened liquids differing concentrations of a xanthan gum-based thickener. *Journal of Texture Studies*, 48, 571–585. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12268>
- Jiménez, N., Bassama, J., & Bohuon, P. (2020). Estimation of the kinetic parameters of anthocyanins degradation at different water activities during treatments at high temperature (100–140 °C) using an unsteady-state 3D model. *Journal of Food Engineering*, 279, 109951. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109951>
- Kala-Lobe, I. (1976). Violation de l'« identité culinaire » négro-africaine. *Présence Africaine*, 99–100(3), 196. <https://doi.org/10.3917/presa.099.0196>
- Kontogiorgos, V., Margelou, I., Georgiadis, N., & Ritzoulis, C. (2012). Rheological characterization of okra pectins. *Food Hydrocolloids*, 29, 356–362. doi:10.1016/j.foodhyd.2012.04.003
- Kouebou, C. P., Achu, M., Nzali, S., Chelea, M., Bonglaisin, J., Kamda, A., ... Kana Sop, M. M. (2013). A review of composition studies of Cameroon traditional dishes: Macronutrients and minerals. *Food Chemistry*, 140, 483–494. doi:10.1016/j.foodchem.2013.01.003
- Kpodo, F. M., Agbenorhevi, J. K., Alba, K., Bingham, R. J., Oduro, I. N., Morris, G. A., & Kontogiorgos, V. (2017). Pectin isolation and characterization from six okra genotypes. *Food Hydrocolloids*, 72, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.014>
- Kpodo, F. M., Agbenorhevi, J. K., Alba, K., Oduro, I. N., Morris, G. A., & Kontogiorgos, V. (2018). Structure-Function Relationships in Pectin Emulsification. *Food Biophysics*. doi:10.1007/s11483-017-9513-4

- Leakey, R. R. B., Greenwell, P., Hall, M. N., Atangana, A. R., Usoro, C., Anegebeh, P. O., Fondoun, J.-M., & Tchoundjeu, Z. (2005). Domestication of *Irvingia gabonensis*: 4. Tree-to-tree variation in food-thickening properties and in fat and protein contents of dika nut. *Food Chemistry*, *90*, 365–378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.04.012>
- Lee, C. S., Chong, M. F., Robinson, J., & Binner, E. (2015). Optimisation of extraction and sludge dewatering efficiencies of bio-flocculants extracted from *Abelmoschus esculentus* (okra). *Journal of Environmental Management*, *157*, 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.028>
- Lousinian, S., Dimopoulou, M., Panayiotou, C., & Ritzoulis, C. (2017). Self-assembly of a food hydrocolloid: The case of okra mucilage. *66*, 190–198.
- Makame, J., Cronje, T., Emmambux, N. M., & De Kock, H. (2019). Dynamic Oral Texture Properties of Selected Indigenous Complementary Porridges Used in African Communities. *Foods*, *8*(6), 221. <https://doi.org/10.3390/foods8060221>
- Mateus-Reguengo, L., Barbosa-Pereira, L., Rembangouet, W., Bertolino, M., Giordano, M., Rojo-Poveda, O., & Zeppa, G. (2019). Food applications of *Irvingia gabonensis* (Aubry-Lecomte ex. O'Rorke) Baill., the 'bush mango': A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–14. doi:10.1080/10408398.2019.1646704
- Mezger, T. G. (2006). *The Rheology Handbook* (2nd ed.). Hannover: Vincentz Network GmbH & Co.
- Moelants, K. R. N., Cardinaels, R., Van Buggenhout, S., Van Loey, A. M., Moldenaers, P., & Hendrickx, M. E. (2014). A Review on the Relationships between Processing, Food Structure, and Rheological Properties of Plant-Tissue-Based Food Suspensions. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *13*, 241–260. doi:10.1111/1541-4337.12059
- Nakauma, M., Ishihara, S., Funami, T., & Nishinari, K. (2011). Swallowing profiles of food polysaccharide solutions with different flow behaviors. *Food Hydrocolloids*, *25*, 1165–1173. doi:10.1016/j.foodhyd.2010.11.003
- Ndjouenkeu, R., Goycoolea, F. M., Morris, E. R., & Akingbala, J. O. (1996). Rheology of okra (*Hibiscus esculentus* L.) and dika nut (*Irvingia gabonensis*) polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*, *29*, 263–269 doi:10.1016/0144-8617(96)00016-1
- Ngoualem, F. K., Nguimbou, R. M., & Ndjouenkeu, R. (2019). Variability and Functionalities of Salts Used in Traditional African Food Preparations. *Journal of Scientific Research and Reports*, *24*, 1–14. doi:10.9734/jsrr/2019/v24i330154
- Nishinari, K., Fang, Y., & Rosenthal, A. (2019). Human oral processing and texture profile analysis parameters: Bridging the gap between the sensory evaluation and the instrumental measurements. *Journal of Texture Studies*, *50*, 369-380. doi:10.1111/jtxs.12404
- Nishinari, K., Hayakawa, F., Xia, C.-F., Huang, L., Meullenet, J.-F., & Sieffermann, J.-M. (2008). Comparative Study of Texture Terms: English, French, Japanese and Chinese. *Journal of Texture Studies*, *39*, 530–568. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2008.00157.x>
- Olorunda, A. O., & Tung, M. A. (1977). Rheology of fresh and frozen okra dispersions. *International Journal of Food Science & Technology*, *12*, 593–598. doi:10.1111/j.1365-2621.1977.tb00145.x
- Owoeye, A. I., Caurie, M. C., Allagheny, N. N., & Onyezili, F. N. (1990). Chemical and physical parameters affecting the viscosity of mixed okra and tomato homogenate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *53*, 283–286. doi:10.1002/jsfa.2740530218

- Richardson, R. K., Morris, E. R., Ross-Murphy, S. B., Taylor, L. J., & Dea, I. C. (1989). Characterization of the perceived texture of thickened systems by dynamic viscosity measurements. *Food Hydrocolloids*, 3, 175–191. doi:10.1016/S0268-005X(89)80002-5
- Ritzoulis, C. (2017). Mucilage formation in food: A review on the example of okra. *International Journal of Food Science & Technology*, 52, 59–67. doi:10.1111/ijfs.13270
- Rosenthal, A. J. (2010). Texture Profile Analysis – How important are the parameters? *Journal of Texture Studies*, 41, 672–684. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2010.00248.x>
- Roulon-Doko, P. (1996). Saveurs et consistances. *Journal des africanistes*, 66, 37–80. <https://doi.org/10.3406/jafr.1996.1458>
- Savouré, T., Dornier, M., Maraval, I., & Collignan, A. (2021). Sensory quantitative descriptive analysis of African slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) preparations and its correlation with instrumental parameters. *Journal of Texture Studies*, jtxs.12583. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12583>
- Savouré, T., Dornier, M., Vachoud, L., & Collignan, A. (2020). Clustering of instrumental methods to characterize the texture and the rheology of slimy okra (*Abelmoschus esculentus*) suspensions. *Journal of Texture Studies*, jtxs.12505. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12505>
- Sengkhamparn, N., Bakx, E. J., Verhoef, R., Schols, H. A., Sajjaanantakul, T., & Voragen, A. G. J. (2009b). Okra pectin contains an unusual substitution of its rhamnosyl residues with acetyl and alpha-linked galactosyl groups. 344, 1842–1851.
- Sengkhamparn, N., Sagis, L. M. C., De Vries, R., Schols, H. A., Sajjaanantakul, T., & Voragen, A. G. J. (2010). Physicochemical properties of pectins from okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *Food Hydrocolloids*, 24, 35–41. doi: 10.1016/j.foodhyd.2009.07.007
- Sengkhamparn, N., Verhoef, R., Schols, H. A., Sajjaanantakul, T., & Voragen, A. G. J. (2009a). Characterisation of cell wall polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). 344, 1824–1832.
- Sharma, M., Kristo, E., Corredig, M., & Duizer, L. (2017). Effect of hydrocolloid type on texture of pureed carrots: Rheological and sensory measures. *Food Hydrocolloids*, 63, 478–487. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.040>
- Slowikowski, K. (2018). ggrepel: Automatically Position Non-Overlapping Text Labels with “ggplot2” (Version 0.8.0). Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=ggrepel>
- Szczesniak, A. S., & Farkas, E. (1962). Objective characterization of the mouthfeel of gum solutions. *Journal of Food Science*, 27, 381–385. doi:10.1111/j.1365-2621.1962.tb00112.x
- Temenouga, V., Charitidis, T., Avgidou, M., Karayannakidis, P. D., Dimopoulou, M., Kalogianni, E. P., Panayiotou, C., & Ritzoulis, C. (2016). Novel emulsifiers as products from internal Maillard reactions in okra hydrocolloid mucilage. *Food Hydrocolloids*, 52, 972–981. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.08.026>
- Terpstra, M. E. J. (2008). Oral texture perception of semisolid foods in relation to physicochemical properties [PhD Thesis]. Wageningen University.
- Terpstra, M. E. J., Jellema, R. H., Janssen, A. M., Wijk, R. a. D., Prinz, J. F., & Linden, E. V. D. (2009). Prediction of Texture Perception of Mayonnaises from Rheological and Novel Instrumental Measurements. *Journal of Texture Studies*, 40, 82–108. doi:10.1111/j.1745-4603.2008.00171.x

- Uzo, J. O., & Ojiako, G. U. (1980). A Physical Method for Measuring Okra Fruit Quality. *Journal of Food Science*, *45*, 390–391. doi:10.1111/j.1365-2621.1980.tb02623.x
- Van Vliet, T. (2002). On the relation between texture perception and fundamental mechanical parameters for liquids and time dependent solids. *Food Quality and Preference*, *13*, 227–236. doi:10.1016/S0950-3293(01)00044-1
- Walls, H. J., Caines, S. B., Sanchez, A. M., & Khan, S. A. (2003). Yield stress and wall slip phenomena in colloidal silica gels. *Journal of Rheology*, *47*, 847–868. doi:10.1122/1.1574023
- Weenen, H., Van Gemert, L. J., Van Doorn, J. M., Dijksterhuis, G. B., & De Wijk, R. A. (2003). Texture and mouthfeel of semisolid foods: commercial mayonnaises, dressings, custard desserts and warm sauces. *Journal of Texture Studies*, *34*, 159–179. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2003.tb01373.x>
- Woguia, A. L., Ngondi, J. L., Boudjeko, T., Rihouey, C., & Oben, E. J. (2012). Hypolipidemic and Antioxidative Effects of Dika Nut (*Irvingia gabonensis*) Seeds and Nkui (*Triumfetta cordifolia*) Stem Bark Mucilages in Triton WR-1339 Induced Hyperlipidemic Rats. *Food Science and Biotechnology*, *21*, 1715–1721. <https://doi.org/10.1007/s10068-012-0228-5>
- Wood, F. W. (1974). An approach to understanding creaminess. *Starch-Stärke*, *26*, 127–130. doi: pdf/10.1002/star.19740260406
- Woolfe, M. L., Chaplin, M. F., & Otchere, G. (1977). Studies on the mucilages extracted from okra fruits (*Hibiscus esculentus* L.) and baobab leaves (*Adansonia digitata* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *28*, 519–529. doi:10.1002/jsfa.2740280609
- Yuan, B., Ritzoulis, C., & Chen, J. (2018). Extensional and shear rheology of a food hydrocolloid. *Food Hydrocolloids*, *74*, 296–306. doi:10.1016/j.foodhyd.2017.08.019
- Zhu, J., & Mizunuma, H. (2017). Shear and Extensional Flow Rheology of Mucilages Derived from Natural Foods. *Nihon Reoroji Gakkaishi*, *45*, 91–99.

Références bibliographiques liées à la conception de l'unité mobile de transformation

- AFNOR. (2013). *Management de la valeur et analyse fonctionnelle NF EN 16271—Février 2013*. AFNOR. <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-16271/management-par-la-valeur-expression-fonctionnelle-du-besoin-et-cahier-des-charges-fonctionnel-exigences-pour-l-expression-et-la-/article/669103/fa164075>
- AGERROUTE. (2019). Programme d'entretien routier 2019 (p. 15).
- Aguilar Voza, M. (2020). Exploring the feasibility of a Mobile processing Unit as a solution for fruit and vegetable sector with a user-oriented innovation approach in Mexico [Wageningen University]. <https://edepot.wur.nl/529846>
- Ahmed, J., Shivhare, U. S., & Sandhu, K. S. (2002). Thermal Degradation Kinetics of Carotenoids and Visual Color of Papaya Puree. *Journal of Food Science*, 67(7), 2692–2695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08800.x>
- Allen, J. K., Seepersad, C., Choi, H., & Mistree, F. (2006). Robust Design for Multiscale and Multidisciplinary Applications. *Journal of Mechanical Design*, 128(4), 832–843. <https://doi.org/10.1115/1.2202880>
- Akinwale, T. O. (2000). Cashew apple juice: Its use in fortifying the nutritional quality of some tropical fruits. *European Food Research and Technology*, 211(3), 205–207. <https://doi.org/10.1007/s002170050024>
- ANSES. *Ciqual—Table de composition nutritionnelle des aliments*. Retrieved December 17, 2020, from <https://ciqual.anses.fr/>
- Asgari, S., Sahari, M. A., & Barzegar, M. (2017). Practical modeling and optimization of ultrasound-assisted bleaching of olive oil using hybrid artificial neural network-genetic algorithm technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140, 422–432. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.025>
- Baldea, M., & Harjunkoski, I. (2014). Integrated production scheduling and process control: A systematic review. *Computers & Chemical Engineering*, 71, 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.09.002>
- Bancal, V., & Tano, K. (2019). Etude des modalités de réduction des pertes après récolte dans les cultures maraichères en Côte d'Ivoire. (p. 91) [Rapport d'expertise]. CIRAD.
- Barbosa-Póvoa, A. P. (2007). A critical review on the design and retrofit of batch plants. *Computers & Chemical Engineering*, 31(7), 833–855. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.08.003>
- Bellemare, M. F., Çakir, M., Peterson, H. H., Novak, L., & Rudi, J. (2017). On the Measurement of Food Waste. *American Journal of Agricultural Economics*, 99(5), 1148–1158. <https://doi.org/10.1093/ajae/aax034>
- Bertsimas, D., Brown, D. B., & Caramanis, C. (2010). *Theory and Applications of Robust Optimization*. <http://arxiv.org/abs/1010.5445>
- Bimbenet, J.-J., Duquenoy, A., & Trystram, G. (2017). *Génie des procédés alimentaires—Des bases aux applications* (2e Edition). Dunod.
- Broutin, C., Barlet, S., Francois, M., & Bastard, G. (2012). Comment développer les métiers agroalimentaires en Afrique subsaharienne ? (p. 68) [Etude/Document de travail]. GRET.

<https://www.gret.org/publication/comment-developper-les-metiers-agroalimentaires-en-afrique-subsaharienne-rapport-de-synthese-de-letude-rapport-final-provisoire/>

Broutin, C., & Bricas, N. (2006). Agroalimentaire et lutte contre la pauvreté en Afrique subsaharienne: Le rôle des micro et petites entreprises. Ed. du GRET.

Broutin, C., & François, M. (2018). Le paysage des entreprises agroalimentaires en Afrique de l'Ouest. *Grain de Sel*, 75, 16–18.

Cauffriez, L., Renaux, D., Bonte, T., & Cocquebert, E. (2013). Systemic modeling of integrated systems for decision making early on in the design process. *Cybernetics and Systems*, 44(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/01969722.2012.732787>

Choi, H.-J., McDowell, D. L., Allen, J. K., & Mistree, F. (2008). An inductive design exploration method for hierarchical systems design under uncertainty. *Engineering Optimization*, 40(4), 287–307. <https://doi.org/10.1080/03052150701742201>

Chutintrasri, B., & Noomhorm, A. (2007). Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. *LWT - Food Science and Technology*, 40(2), 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.11.003>

CIE. (2020). *Tarifs d'électricité*. CIE Compagnie Ivoirienne d'Electricité. <http://www.cie.ci/particuliers/vos-consommations/tarifs-electricite>

Costa, C., & Delgado, C. (2019). *The Cassava Value Chain in Mozambique*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/31754>

Costa, N. R., Lourenço, J., & Pereira, Z. L. (2011). Desirability function approach: A review and performance evaluation in adverse conditions. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107(2), 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2011.04.004>

Cuevas, R. (2004). The agrofood sector as system. In *Food engineering, quality and competitiveness in small food industry systems with emphasis on Latin America and the Caribbean* (FAO).

Datta, A. K. (2008). Status of Physics-Based Models in the Design of Food Products, Processes, and Equipment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 121–129. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00030.x>

Datta, A. K. (2016). Toward computer-aided food engineering: Mechanistic frameworks for evolution of product, quality and safety during processing. *Journal of Food Engineering*, 176, 9–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.010>

Dawei, Z., Jinyu, Z., Chunqiu, L., & Zhiling, W. (2021). A short review of reliability-based design optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1043(3), 032041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1043/3/032041>

Deka, D., & Datta, D. (2017). Multi-objective optimization of the scheduling of a heat exchanger network under milk fouling. *Knowledge-Based Systems*, 121, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.12.027>

Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>

Dietz, A., Azzaro-Pantel, C., Pibouleau, L., & Domenech, S. (2005). A Framework for Multiproduct Batch Plant Design with Environmental Consideration: Application To Protein Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(7), 2191–2206. <https://doi.org/10.1021/ie049499m>

- Dietz, A., Azzaro-Pantel, C., Pibouleau, L., & Domenech, S. (2006). Multiobjective optimization for multiproduct batch plant design under economic and environmental considerations. *Computers & Chemical Engineering*, 30(4), 599–613. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2005.10.017>
- Dimian, A. C., Bildea, C. S., & Kiss, A. A. (2014). *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes* (Second Edition). Elsevier.
- Duret, S., Hamon, E., Hoang, H.-M., Stahl, V., Derens-Bertheau, E., Delahaye, A., & Laguerre, O. (2020). Modelling methodology of temperature and energy consumption in food plant: Application to puff pastry. *International Journal of Refrigeration*, 115, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.03.009>
- E, W., Engquist, B., Li, X., Ren, W., & Vanden-Eijnden, E. (2007). Heterogeneous Multiscale Methods: A Review. *Communications in Computational Physics*, 2(3), 367–450.
- FAO. (2020). Mitigating risks to food systems during COVID-19: Reducing food loss and waste. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9056en>
- FAOSTAT. (2021). FAOSTAT. FAO. <http://www.fao.org/faostat/fr/#home>
- Gero, J. S., & Kannengiesser, U. (2014). The Function-Behaviour-Structure Ontology of Design. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Eds.), *An Anthology of Theories and Models of Design* (pp. 263–283). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_13
- Godjo, T., Boujut, J.-F., Marouzé, C., & Giroux, F. (2015). *A participatory design approach based on the use of scenarios for improving local design methods in developing countries*. hal-01206430v2.
- Godoy, H. T., & Rodriguez-Amaya, D. B. (2007). Changes in individual carotenoids on processing and storage of mango (*Mangifera indica*) slices and purée. *International Journal of Food Science & Technology*, 22(5), 451–460. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb00510.x>
- Gustavsson, J. (Ed.). (2011). *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. FAO.
- Gwilliam, K., Foster, V., Archondo-Callao, R., Briceño-Garmendia, C., & Nogales, A. (2008). *Les routes en Afrique subsaharienne* (p. 10). Banque Mondiale, SSATP. <http://eu-africa-infrastructure-tf.net/attachments/library/aicd-background-paper-14-roads-sect-summary-fr.pdf>
- Harrington, E. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494–498.
- He, Z., & Yen, G. G. (2016). Visualization and Performance Metric in Many-Objective Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 20(3), 386–402. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2015.2472283>
- Ho, Q. T., Carmeliet, J., Datta, A. K., Defraeye, T., Delele, M. A., Herremans, E., Opara, L., Ramon, H., Tijssens, E., van der Sman, R., Van Liedekerke, P., Verboven, P., & Nicolaï, B. M. (2013). Multiscale modeling in food engineering. *Journal of Food Engineering*, 114(3), 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.019>
- Ingram, G. D., Cameron, I. T., & Hangos, K. M. (2004). Classification and analysis of integrating frameworks in multiscale modelling. *Chemical Engineering Science*, 59(11), 2171–2187. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.02.010>
- Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L. K., & Young, T. (2010). Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research*, 13.

- Johansson, B., Skoogh, A., Mani, M., & Leong, S. (2009). Discrete event simulation to generate requirements specification for sustainable manufacturing systems design. *Proceedings of the 9th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems - PerMIS '09*, 38. <https://doi.org/10.1145/1865909.1865918>
- Kitinoja, L., Saran, S., Roy, S. K., & Kader, A. A. (2011). Postharvest technology for developing countries: Challenges and opportunities in research, outreach and advocacy: Postharvest technology for developing countries. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(4), 597–603. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4295>
- Koller, R. W., & Ricardez-Sandoval, L. A. (2017). A dynamic optimization framework for integration of design, control and scheduling of multi-product chemical processes under disturbance and uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 106, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.007>
- Koller, R. W., Ricardez-Sandoval, L. A., & Biegler, L. T. (2018). Stochastic back-off algorithm for simultaneous design, control, and scheduling of multiproduct systems under uncertainty. *AIChE Journal*, 64(7), 2379–2389. <https://doi.org/10.1002/aic.16092>
- Leung Pah Hang, M. Y., Martinez-Hernandez, E., Leach, M., & Yang, A. (2016). Designing integrated local production systems: A study on the food-energy-water nexus. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1065–1084. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.194>
- Li, J., Ge, W., Zhang, J., & Kwauk, M. (2005). Multi-Scale Compromise and Multi-Level Correlation in Complex Systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(6), 574–582. <https://doi.org/10.1205/cherd.05093>
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J., & Wang, S. (2015). Kinetics of Food Quality Changes During Thermal Processing: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 343–358. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1398-3>
- Liu, Y., Shi, Y., Zhou, Q., & Xiu, R. (2016). A sequential sampling strategy to improve the global fidelity of metamodels in multi-level system design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53(6), 1295–1313. <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1379-9>
- Madoumier, M., Trystram, G., Sébastien, P., & Collignan, A. (2019). Towards a holistic approach for multi-objective optimization of food processes: A critical review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.002>
- Marcotte, S., & Montreuil, B. (2016). Introducing the Concept of Hyperconnected Mobile Production. 16.
- Madoumier, M., Trystram, G., Sébastien, P., & Collignan, A. (2019). Towards a holistic approach for multi-objective optimization of food processes: A critical review. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.002>
- Marouli, A. Z., & Maroulis, Z. B. (2005). Cost data analysis for the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67(3), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.031>
- Martinez-Hernandez, E. (2017). Trends in sustainable process design—From molecular to global scales. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 17, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.05.005>
- Marcotte, S., & Montreuil, B. (2016). *Introducing the Concept of Hyperconnected Mobile Production*. 16.
- Messer, M., Panchal, J. H., Allen, J. K., & Mistree, F. (2011). Model refinement decisions using the process performance indicator. *Engineering Optimization*, 43(7), 741–762. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2010.512086>

- Ming, Z., Balu Nellippallil, A., Wang, G., Yan, Y., Allen, J. K., & Mistree, F. (2021). A performance based method for information acquisition in engineering design under multi-parameter uncertainty. *Information Sciences*, 546, 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.09.034>
- Moller, B., Voglhuber-Slavinsky, A., & Dönitz, E. (2020). *Three scenarios for Europe's food sector in 2035* (p. 60). Fraunhofer ISI. <https://www.fox-foodprocessinginabox.eu/brochure-three-scenarios-for-europes-food-sector-in-2035/>
- Moreno, M. S., & Montagna, J. M. (2007). Optimal Simultaneous Design and Operational Planning of Vegetable Extraction Processes. *Food and Bioproducts Processing*, 85(4), 360–371. <https://doi.org/10.1205/fbp07069>
- Nemirovski, A. (2019). *Robust Optimization* [Data set]. <https://doi.org/10.1287/e356790b-ddcc-4920-a645-a2d08c6334bb>
- Olajire, A. A. (2020). The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production*, 22.
- Panchal, J. H., Choi, H.-J., Shephard, J., Allen, J. K., McDowell, D. L., & Mistree, F. (2005). A Strategy for Simulation-Based Multiscale, Multi-Functional Products and Associated Design Processes. *Volume 2: 31st Design Automation Conference, Parts A and B*, 845–857. <https://doi.org/10.1115/DETC2005-85316>
- Panchal, J. H., Kalidindi, S. R., & McDowell, D. L. (2013). Key computational modeling issues in Integrated Computational Materials Engineering. *Computer-Aided Design*, 45(1), 4–25. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.06.006>
- Panchal, J. H., Paredis, C. J. J., Allen, J. K., & Mistree, F. (2008). A value-of-information based approach to simulation model refinement. *Engineering Optimization*, 40(3), 223–251. <https://doi.org/10.1080/03052150701690764>
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36–60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Patil, B. P., Maia, E., & Ricardez-Sandoval, L. A. (2015). Integration of scheduling, design, and control of multiproduct chemical processes under uncertainty. *AIChE Journal*, 61(8), 2456–2470. <https://doi.org/10.1002/aic.14833>
- Penazzi, S., Accorsi, R., Ferrari, E., Manzini, R., & Dunstall, S. (2017). Design and control of food job-shop processing systems: A simulation analysis in the catering industry | Emerald Insight. *The International Journal of Logistics Management*, 28(3), 782–797. <https://doi.org/10.1108/IJLM-11-2015-0204>
- Phinney, D. M., Frelka, J. C., & Heldman, D. R. (2017). Composition-Based Prediction of Temperature-Dependent Thermophysical Food Properties: Reevaluating Component Groups and Prediction Models. *Journal of Food Science*, 82(1), 10.
- Purshouse, R. C., Deb, K., Mansor, M. M., Mostaghim, S., & Wang, R. (2014). A review of hybrid evolutionary multiple criteria decision making methods. *2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, 1147–1154. <https://doi.org/10.1109/CEC.2014.6900368>
- Quirante, T. (2012). *Modelling and numerical optimization methods for decision support in robust embodiment design of products and processes*. Université Bordeaux 1.

- Quirante, T., Sebastian, P., & Ledoux, Y. (2013). A trade-off function to tackle robust design problems in engineering. *Journal of Engineering Design*, 24(1), 64–81. <https://doi.org/10.1080/09544828.2012.691160>
- Raffray, G., Collignan, A., & Sebastian, P. (2015). Multiobjective optimization of the preliminary design of an innovative hot-smoking process. *Journal of Food Engineering*, 158, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.010>
- Rao, M. A., Rizvi, S. S. H., & Datta, A. K. (Eds.). (2005). *Engineering properties of foods* (3rd ed). Taylor & Francis.
- Rattanathanalerk, M., Chiewchan, N., & Srichumpoung, W. (2005). Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice. *Journal of Food Engineering*, 66(2), 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.016>
- Rivier, M. (2017). *Analyse et optimisation multicritères d'un procédé de transfert thermique et de séchage pour une application en Afrique de l'Ouest*. Institut national d'études supérieures agronomiques de Montpellier.
- Romdhana, H., Bonazzi, C., & Esteban-Decloux, M. (2016). Computer-aided process engineering for environmental efficiency: Industrial drying of biomass. *Drying Technology*, 34(10), 1253–1269. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1104348>
- Rossi, F., Casas-Orozco, D., Reklaitis, G., Manenti, F., & Buzzi-Ferraris, G. (2017). A computational framework for integrating campaign scheduling, dynamic optimization and optimal control in multi-unit batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 107, 184–220. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.024>
- Roustan, M., Pharamond, J.-C., & Line, A. (1999). *Agitation. Mélange—Concepts théoriques de base*. 25.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9–26.
- Sheahan, M., & Barrett, C. B. (2017). Review: Food loss and waste in Sub-Saharan Africa. *Food Policy*, 70, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.03.012>
- Scott, M. J., & Antonsson, E. K. (1998). Aggregation functions for engineering design trade-offs. *Fuzzy Sets and Systems*, 99(3), 253–264. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(97\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(97)00032-8)
- Sebastian, P., Quirante, T., Ho Kon Tiat, V., & Ledoux, Y. (2010). Multi-objective optimization of the design of two-stage flash evaporators: Part 2. Multi-objective optimization. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(12), 2459–2466. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.07.002>
- Semassou, C., Nadeau, J. P., Sebastian, P., Pailhès, J., & Vianou, A. (2013). Optimisation multicritère en conception de système photovoltaïque pour des maisons individuelles en contexte africain. *Revue des Energies Renouvelables*, 16(2), 225–246.
- Simpson, R., & Abakarov, A. (2009). Optimal scheduling of canned food plants including simultaneous sterilization. *Journal of Food Engineering*, 90(1), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.009>
- Simpson, R., Almonacid, S., & Teixeira, A. (2003). OPTIMIZATION CRITERIA FOR BATCH RETORT BATTERY DESIGN AND OPERATION IN FOOD CANNING-PLANTS. *Journal of Food Process Engineering*, 25(6), 515–538. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2003.tb00649.x>

- Sinha, A., Bera, N., Allen, J. K., Panchal, J. H., & Mistree, F. (2013). Uncertainty Management in the Design of Multiscale Systems. *Journal of Mechanical Design*, 135(1), 011008. <https://doi.org/10.1115/1.4006186>
- Stathers, T., Holcroft, D., Kitinoja, L., Mvumi, B. M., English, A., Omotilewa, O., Kocher, M., Ault, J., & Torero, M. (2020). A scoping review of interventions for crop postharvest loss reduction in sub-Saharan Africa and South Asia. *Nature Sustainability*, 3(10), 821–835. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00622-1>
- Trystram, G. (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.001>
- Tusar, T., & Filipic, B. (2015). Visualization of Pareto Front Approximations in Evolutionary Multiobjective Optimization: A Critical Review and the Prosection Method. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 19(2), 225–245. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2014.2313407>
- Vargas-Bautista, J. P., García-Cuellar, A. J., Pérez-García, S. L., & Rivera-Solorio, C. I. (2017). Transient simulation of a solar heating system for a small-scale ethanol-water distillation plant: Thermal, environmental and economic performance. *Energy Conversion and Management*, 134, 347–360. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.041>
- Vásquez-Caicedo, A. L., Schilling, S., Carle, R., & Neidhart, S. (2007). Effects of thermal processing and fruit matrix on β -carotene stability and enzyme inactivation during transformation of mangoes into purée and nectar. *Food Chemistry*, 102(4), 1172–1186. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.005>
- Vega, P., Lamanna de Rocco, R., Revollar, S., & Francisco, M. (2014). Integrated design and control of chemical processes – Part I: Revision and classification. *Computers & Chemical Engineering*, 71, 602–617. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.05.010>
- Wang, H., Olhofer, M., & Jin, Y. (2017). A mini-review on preference modeling and articulation in multi-objective optimization: Current status and challenges. *Complex & Intelligent Systems*, 3(4), 233–245. <https://doi.org/10.1007/s40747-017-0053-9>
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., & Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- Wang, Z., Parhi, S. S., Rangaiah, G. P., & Jana, A. K. (2020). Analysis of Weighting and Selection Methods for Pareto-Optimal Solutions of Multiobjective Optimization in Chemical Engineering Applications. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 18.
- Wang, Z., & Rangaiah, G. P. (2017). Application and Analysis of Methods for Selecting an Optimal Solution from the Pareto-Optimal Front obtained by Multiobjective Optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(2), 560–574. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b03453>
- Wari, E., & Zhu, W. (2016). A survey on metaheuristics for optimization in food manufacturing industry. *Applied Soft Computing*, 46, 328–343. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.034>
- Yang, A., & Marquardt, W. (2009). An ontological conceptualization of multiscale models. *Computers & Chemical Engineering*, 33(4), 822–837. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.11.015>
- Zhou, A., Qu, B.-Y., Li, H., Zhao, S.-Z., Suganthan, P. N., & Zhang, Q. (2011). Multiobjective evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1), 32–49. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.03.001>

Références bibliographiques correspondantes aux outils et logiciels informatiques utilisés

- de Mendiburu, F. (2019). *agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research* (Version 1.3-1) [Computer software]. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. In *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. 6th International Conference Paris, France, September 18-20, 2000 Proceedings* (Vol. 1917, pp. 849–858). Springer.
- Fortin, F.-A., De Rainville, F.-M., Gardner, M.-A., Parizeau, M., & Gagné, C. (2012). DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy. *Journal of Machine Learning Research*, 13, 2171–2175.
- Kassambara, A. (2018). ggpubr: “ggplot2” Based Publication Ready Plots (Version 0.2). Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>
- Kießling, W. (2002). Foundations of Preferences in Database Systems. In *VLDB '02: Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Databases* (pp. 311–322). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-155860869-6/50035-4>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Lenth, R. V. (2009). Response-Surface Methods in R, Using rsm. *Journal of Statistical Software*, 32(7), 1–17. doi:10.18637/jss.v032.i07
- Lünsdorf, O., & Scherfke, S. (2020). *SimPy: Discrete-Event Simulation for Python* (3.0.12) [Python 3]. <https://simpy.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- R Core Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing (Version R-3.5.1). Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., & et al. (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 18, 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., & et al. (2012). Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods*, 7(9), 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
- Wei, T., & Simko, V. (2017). R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). Retrieved from <https://github.com/taiyun/corrplot>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Retrieved from <http://ggplot2.org>

Annexes

Liste des figures

<i>Figure A. 1 : Représentation graphique de la température au sein de l'autoclave en fonction du temps avec 4 phases du traitement thermique : i. Coming up phase, ii. Holding phase, iii. Coming down phase, iv. Cooling phase.</i>	182
<i>Figure A. 2 : Schematic view (not to scale) of the bottles (a) and the stand-up pouches (b) computational domain 2D.</i>	183
<i>Figure A. 3 : Comparaison entre les températures à cœur observées et simulées par le modèle pour la valeur de h_{int} retenue.</i>	185
<i>Figure A. 4 : Schéma du fonctionnement du DES. Lorsque les conditions sont réunies, les évènements sont générés et s'ajoutent dans la queue (le symbole + indique qu'un évènement est créé ; le symbole indique que l'évènement est en attente de déclenchement ; le triangle symbolise le déclenchement de l'évènement). Si un opérateur et de la matière première sont disponibles, l'évènement est déclenché. Lorsque l'opération unitaire est terminée, l'opérateur redevient disponible et le produit est transféré dans la zone de stockage suivante. .</i>	188

Liste des tableaux

Tableau A. 1 : Rendements matière pour chaque opération unitaire.....	166
Tableau A. 2 : Données utilisées pour caractériser l'étape de transfert.....	166
Tableau A. 3 : Pour chaque produit fini, opérations unitaires entre lesquelles le transfert était réalisé à l'aide d'une cuve de transfert.	166
Tableau A. 4 : Prise en compte des transferts qui n'étaient pas réalisés à l'aide de cuves de transferts	167
Tableau A. 5 : Données utilisées pour caractériser les opérations unitaires de lavage et de tri-parage.	167
Tableau A. 6 : Nombre de postes de travail créés pour l'opération de lavage et l'opération de tri-parage en fonction du nombre d'opérateurs affectés à l'équipe 1.....	168
Tableau A. 7 : Dimensions, et prix des cuves de blanchiment (données équipementiers) pour la variable e_{blanch}	168
Tableau A. 8 : Caractéristiques estimées pour les cuves de blanchiment correspondant à la variable e_{blanch} .	169
Tableau A. 9 : Caractéristiques des cutters simples et sous-vide possibles pour la variable $e_{cutt.}$	171
Tableau A. 10 : Caractéristiques des grinders et des grinder-cutters possibles pour la variable e_{grind}	172
Tableau A. 11 : Capacité des grinders simples et des grinder cutters selon leur configuration	172
Tableau A. 12 : Caractéristiques des dépulpeuses associées à la variable e_{pulp}	173
Tableau A. 13 : Caractéristiques générales des presses à paquets possibles pour la variable e_{press}	173
Tableau A. 14 : Capacité et durée de batch des presse à paquets possibles pour la variable e_{press}	174
Tableau A. 15 : Caractéristiques des cuves d'homogénéisation associées à la variable e_{homo}	174
Tableau A. 16 : Extrapolation et estimation des temps de mélange des différentes cuves d'homogénéisation associés à la variable e_{homo}	175
Tableau A. 17 : Caractéristiques des modèles de doseuses-remplisseuses associés à la variable e_{fill}	176
Tableau A. 18 : Durée d'un cycle pour les doseuses simples et pour les doseuses-visseuses.	177
Tableau A. 19 : Caractéristiques des 2 modèles de thermoscelleuses possibles pour sceller les sachets souples (variable e_{vac}) et de la capsuleuse et de la visseuse possibles pour sceller les bouteilles (les dimensions indiquées ne prennent pas en compte les dimensions de la table sur laquelle ils doivent reposer).	177
Tableau A. 20 : Types et dimensions des modèles d'autoclaves associés à la variable e_{auto}	179
Tableau A. 21 : Capacités et consommation d'eau des modèles d'autoclaves associés à la variable e_{auto}	179
Tableau A. 22 : Caractéristiques énergétiques et prix des modèles d'autoclaves associés à la variable e_{auto} .	180
Tableau A. 23 : Dimensions des emballages utilisés pour la modélisation.....	182
Tableau A. 24 : Composition de la purée de gombo (Inyang & Ike, 1998) et des autres produits (ANSES, n.d.)	184
Tableau A. 25 : Hypothèses utilisées pour estimer la valeur de h_{ext}	185
Tableau A. 26 : Données utilisées pour calculer le coefficient de transfert de chaleur dans l'emballage h_{pack} .	185
Tableau A. 27 : Valeurs de hint qui ont été identifiées pour chaque couple (aliment ; type d'emballage).....	185
Tableau A. 23 : Tâches et temps de lavage par équipe	187

<i>Tableau A. 29 : Priorités affectées aux opérations unitaires affectées aux 4 équipes de travail et conditions de déclenchement des évènements « chargement du poste de travail »</i>	190
<i>Tableau A. 30 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le coût DDP (Delivered Duty Paid) des équipements d'une solution</i>	194
<i>Tableau A. 31 : Caractéristiques des modèles de containers aménagés possibles</i>	195
<i>Tableau A. 32 : Caractéristiques des modèles de semi-remorques possibles</i>	195
<i>Tableau A. 33 : Caractéristiques des modèles de systèmes de levage (« lifting system ») possibles</i>	196
<i>Tableau A. 34 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le coût de revient la MPU pour le fabricant</i>	196
<i>Tableau A. 35 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de vente de la MPU et de ses accessoires</i>	197
<i>Tableau A. 36 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de location annuel de la MPU</i>	197
<i>Tableau A. 37 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de location mensuel de la MPU</i>	198
<i>Tableau A. 38 : Proportions d'ingrédients à ajouter dans la purée de mangue pour obtenir du nectar (en kg/kg de purée de mangue)</i>	198
<i>Tableau A. 39 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de location annuel de la MPU</i>	199
<i>Tableau A. 40 : Prix des emballages possibles</i>	199
<i>Tableau A. 41 : Tarifs de la consommation d'eau en Côte d'Ivoire (SODECI)</i>	200
<i>Tableau A. 42 : Tarif professionnel général basse tension (CIE, 2020)</i>	200
<i>Tableau A. 43 : Nombre et salaire des différents employés de la MPU</i>	201
<i>Tableau A. 44 : Prix de cession des produits finis sortie MPU</i>	201
<i>Tableau A. 45 : Performance indicator values of the resulting solution per final product (and corresponding IDIkp in brackets)</i>	203
<i>Tableau A. 46 : Combination of modalities selected for equipment variables and forming the resulting design solution. The consistency of the modalities contained in the resulting solution (s_{res}) was analysed by observing the characteristics of the possible equipment models and by observing the differences between the 36 most satisfying solutions.</i>	204
<i>Tableau A. 47 : Combination of modalities selected for control variables and forming the resulting design solution. The consistency of the modalities contained in the resulting solution (s_{res}) was analysed by observing the characteristics of the possible equipment models and by observing the differences between the 36 most satisfying solutions.</i>	205
<i>Tableau A. 48 : Description et priorisation des améliorations possibles en tenant compte du rapport entre leur utilité potentielle pour la décision de conception (amélioration du degré de satisfaction, de la cohérence et de la faisabilité de la solution obtenue) et du coût de leur mise en œuvre (manipulations expérimentales, temps nécessaire pour modifier l'outil etc). L'échelle qui a été utilisée pour quantifier l'utilité et le coût des améliorations possibles est la suivante : 1 = Très faible ; 2 = Faible ; 3 = Moyen ; 4 = Elevé ; 5 = Très élevé.</i>	206

Annexes n°1

Annexe n°1: Modèles utilisés pour construire l'outil d'aide à la décision

Dans cette Annexe, les hypothèses et les modèles utilisés pour construire l'outil de simulation multi-échelle (Partie 2.2 du Chapitre 6) sont décrites et présentées par niveau fonctionnel. Les parties 1, 2 et 3 présenteront successivement les modèles utilisés au niveau de l'opération unitaire, du procédé et de l'atelier.

1. Modèles utilisés au niveau de l'opération unitaire

1.1. Modélisation des opérations unitaires en fonction des caractéristiques des équipements

Les performances (rendement ; durée opératoire ; qualité du produit fini ; ressources immobilisées et/ou consommées) de chaque UO ont été estimées par batch de produit traité en fonction des caractéristiques techniques des modèles d'équipements possibles (capacité, débit, utilités nécessaires/consommées) et/ou des autres variables de conception (format de l'emballage et conditions opératoires de la stabilisation thermique) et/ou du produit fini. Les principes des modèles utilisés sont les suivants :

- **Rendement** : l'hypothèse est que le rendement de chaque UO dépendait du produit fini mais ne variait pas en fonction du type et du modèle d'équipement utilisé. De plus, la masse volumique de chaque produit était considérée constante et égale à 1 kg/L.
- **Durée opératoire / batch** (temps nécessaire pour traiter un batch de produit) : Pour les équipements semi-continus, ce temps était obtenu à partir de leur débit nominal en calculant le temps nécessaire pour traiter la quantité de produit contenu dans une cuve de transfert. Pour les équipements discontinus, ce temps était calculé à partir de leur capacité. Pour le blanchiment et la stabilisation thermique, des modèles prenant en compte les transferts de chaleurs au sein du produit ont été utilisés. Pour l'homogénéisation, le temps de mélange a été extrapolé à partir des conditions de mélange définies pour un modèle de référence par type de cuve.
- **Temps de chargement et de déchargement des produits dans l'équipement** : Selon les UO et les équipements, ces temps ont été estimés en tenant compte de la capacité de l'équipement et des tâches à réaliser pour le charger/décharger. Les hypothèses utilisées sont détaillées dans les modèles UO en annexes.
- **Opérateur requis pendant l'exécution de l'UO** : Pour la plupart des équipements, un opérateur était nécessaire pendant l'exécution de l'UO (e.g. broyage, pressage etc). Pour d'autres équipements (autoclave par exemple), l'opérateur n'était mobilisé que pendant les phases de chargement et de déchargement.
- **Consommation en eau / batch** : Le volume d'eau nécessaire par batch pour les UO de lavage, de blanchiment et de stabilisation thermique a été déterminée à partir de la capacité des équipements.
- **Consommation en gaz / batch** : La quantité de gaz nécessaire par batch de blanchiment et de stabilisation thermique a été déterminée en tenant compte de la puissance des brûleurs et du temps nécessaire pour atteindre la température de traitement.

A noter que pour certaines familles et types d'équipements, les variables liées à certaines fonctions spécifiques ont été intégrées sous forme d'option (e.g. mise sous vide des cuves et des broyeurs ; mode de chauffage des autoclaves). En fonction de ces options, la recette (figure 26) et/ou le calcul des performances des opérations unitaires pouvait différer.

1.2. Rendements matière par opération unitaire

Les rendements des opérations unitaires nécessaires pour obtenir chacun des 4 produits finis sont présentés dans le tableau A. 1. A noter que dans tout le modèle de simulation, l'hypothèse a été faite que la masse volumique de toutes les matières premières était équivalente à celle de l'eau.

Tableau A. 1 : Rendements matière pour chaque opération unitaire

Unit Operation	Mass yield of unit operation (kg/ kg)			
	Okra Puree	Mango Puree	Mango Nectar	Pineapple Juice
Washing	100 %	100 %	100 %	100 %
Sorting	90 %	80 %	80 %	90 %
Triming	95 %	52 %	52 %	55 %
Blanching	100 %	-	-	-
Pulping	-	90 %	90 %	-
Grinding (or Cutting)	100 %	-	-	100 %
Pressing	-	-	-	80 %
Homogeneisation	100 %	100 %	400 %	100 %
Whole recipe	86 %	37 %	150 %*	40 %

* : produit formulé avec ajout de sucre et d'eau dans la purée.

1.3. Transferts et stockage de produits intermédiaires

Tableau A. 2 : Données utilisées pour caractériser l'étape de transfert.

Family	Equipement type	Duration (min/batch)	Capacity (kg/batch)	Diameter (mm)	Operator required while working	Loading time (min/batch)	Unloading time (min/batch)	EXW Price (€ excl. Tax)
Transfer	Transfer bin	4	28	480	TRUE	0	0	33

Les cuves de transfert dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau A.2 étaient utilisées pour transférer manuellement les produits intermédiaires entre les opérations unitaires présentées dans tableau A.3. Pour estimer leur capacité, nous avons considéré que leur volume utile correspondait à 80% du volume nominal (35 L). Chaque opération de transfert mobilisait 2 opérateurs pendant 3 min et était réalisée par les opérateurs au fur et à mesure où ils avaient besoin de matière pour effectuer les opérations unitaires dont ils étaient chargés. Cela supposait que ces cuves servaient également d'espace de stockage intermédiaire entre lesdites opérations unitaires. Pour estimer l'espace occupé par les cuves de transfert pleines (0.23 m²/cuve), elles étaient assimilées à un carré.

Tableau A. 3 : Pour chaque produit fini, opérations unitaires entre lesquelles le transfert était réalisé à l'aide d'une cuve de transfert.

Okra Puree	Mango Puree	Mango Nectar	Pineapple Juice
Triming to Blanching	Triming to Pulping		Triming to Grinding
Blanching to Cutting	Pulping to Homogeneisation		Grinding to Pressing
Cutting to Homogeneisation			Pressing to Homogeneisation

Pour les transferts entre les autres opérations unitaires, le tableau A.4 synthétise comment les temps de transferts et l'espace au sol nécessaires ont été pris en compte.

Tableau A. 4 : Prise en compte des transferts qui n'étaient pas réalisés à l'aide de cuves de transferts

Transfert entre	Prise en compte du temps de transfert	Prise en compte de l'espace au sol correspondant pour calculer S_{floor}
Espace de stockage des matières premières vers la station de lavage	Temps de transfert inclus dans le temps de chargement du lavage	Aucun car opérations unitaires effectuées hors du container.
Station de lavage vers la table de parage	Temps de transfert inclus dans le temps de déchargement du lavage	
Cuve d'homogénéisation vers doseuse	Temps de transfert considéré comme nul car il est réalisé au coup par coup par une pompe de transfert au fur et à mesure où la trémie se vide (2 min / opération de transfert de produit de la cuve d'homogénéisation vers la trémie de la doseuse). Si il y avait plusieurs cuves d'homogénéisation, la pompe vidait les cuves les unes après les autres.	Espace au sol nul car le produit intermédiaire est stocké temporairement dans la cuve d'homogénéisation puis dans la trémie de la doseuse.
Doseuse vers équipement de scellage (thermoscelleuse, visseuse ou capsuleuse)	Temps de transfert considéré comme nul car les équipements sont installés les uns à côté des autres.	Espace au sol nul car le produit conditionné est posé temporairement entre la doseuse et l'équipement de scellage.
Equipement de scellage vers autoclave	Temps de transfert considéré comme un temps masqué (nul) car les produits sont placés dans le panier de l'autoclave par l'opérateur dédié à l'autoclave (équipe 4) au fur et à mesure qu'ils sont scellés. A la fin du cycle de stabilisation thermique, ce même opérateur est chargé de sortir le panier de l'autoclave et de l'évacuer finis hors du conteneur.	Espace au sol correspondant au panier d'autoclave car 1 panier doit toujours être disponible pour que les emballages puissent y être chargés.
Autoclave vers espace de stockage des produits finis		Espace au sol correspondant à 1 panier d'autoclave

1.4. Lavage et tri-parage

Le tableau A.5 présente les données utilisées pour caractériser les opérations de lavage et de tri-parage. Pour effectuer le lavage, des cuves circulaires de 75 L étaient utilisées. Nous avons considéré qu'elles pouvaient être remplies avec 50% de matière première et 25% d'eau (soit 37 kg de matière première et 27 L d'eau).

Pour effectuer le tri et le parage, des tables peuvent être utilisées. L'opération de parage consiste à équeuter les gombos, éplucher et dénoyauter les mangues ou éliminer la couronne des ananas et les trancher. Comme le chargement et le déchargement se font au fur et à mesure de l'avancement de l'opération, le temps correspondant est compris dans le temps d'exécution. Comme ces opérations étaient effectuées à l'extérieur du container, le poids et les dimensions des cuves de lavage et des tables n'ont pas été pris en compte.

Tableau A. 5 : Données utilisées pour caractériser les opérations unitaires de lavage et de tri-parage.

Family	Equipement type	Duration (min/batch)	Capacity (kg/batch)	Operator required while working	Loading time (min/batch)	Unloading time (min/batch)	EXW Price (€ excl. Tax)	Volume of water (L/batch)
Washing	Washing bin	5	37	TRUE	5	5	56	27
Table	Table	10	20	TRUE	0	0	545	0

Le tableau A.6 présente quel était le nombre de postes de travail affectés au lavage et à l'opération de tri-parage en fonction du nombre d'opérateurs de l'équipe n°1. Pour déterminer le nombre de cuves de lavage et de tables nécessaires, nous avons considéré qu'il fallait :

- 1 cuve de lavage par poste de lavage,
- 1/2 table de tri-parage par poste de tri-parage.

Tableau A. 6 : Nombre de postes de travail créés pour l'opération de lavage et l'opération de tri-parage en fonction du nombre d'opérateurs affectés à l'équipe 1

Nombre d'opérateurs affectés à l'équipe 1	Nombre de postes de travail créés pour l'opération lavage	Nombre de postes de travail créés pour l'opération de tri-parage
3	1	2
4	2	2
5	2	3
6	3	3

1.5. Blanchiment

1.5.1. Caractéristiques générales des cuves de blanchiment

Dans le cas du gombo (seul produit blanchi), les principales caractéristiques des 7 cuves de blanchiment correspondant à la variable e_{blanch} sont présentées dans les tableaux tableau A.7 et A.8. Ces cuves sont toutes pourvues d'un bruleur à gaz. Du fait de sa paroi calorifugée, l'efficacité du modèle no 7 était supérieure (60 %) à celle des 6 autres modèles (40 %). En considérant que le barème de blanchiment du gombo est de 2 min lorsque la température à cœur atteint $T_{\text{blanch}} = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$, et à partir des caractéristiques qui étaient connues (dimensions de la cuve, volume nominal et puissance du bruleur), la capacité, la consommation en eau et en gaz par batch ainsi que la durée d'un batch de blanchiment ont été calculées. Quel que soit le modèle de blanchiment, 2 min était nécessaire pour charger puis décharger le panier dans la cuve. Pour estimer la capacité des modèles de blanchiment, nous avons considéré que le panier de chaque modèle avait une contenance égale à 1/3 du volume nominal de la cuve.

Tableau A. 7 : Dimensions, et prix des cuves de blanchiment (données équipementiers) pour la variable e_{blanch}

Equipement type	Model ID	Weight (kg)	Diameter (mm)	Total height (mm)	Nominal Volume (L)	Equipment EXW Price (€ excl. Tax)
Single vat with burner	1	3,5	420	360	50	389
	2	3,5	420	360	50	565
	3	3,75	420	550	75	615
	4	3,5	420	360	50	629
	5	3,75	420	550	75	679
	6	4	550	430	100	718
Insulated vat with burner	7	3,3	365	300	30	968

Tableau A. 8 : Caractéristiques estimées pour les cuves de blanchiment correspondant à la variable e_{blanch}

Abbreviation	m_{okra}	Φ_{burn}	η_{blanch}	t_{load}	t_{blanch}	t_{unload}	$m_{water/batch}$	$m_{gas/batch}$
Model ID	Capacity (kg/batch)	Burner power (kW)	Blanching vat efficiency (%)	Loading time (min / batch)	Duration (min / batch)	Unloading time (min / batch)	Water Consumption (L / batch)	Butane consumption (kg / batch)
1	17	8,5	40 %	2	29	2	0,29	0,32
2	17	10	40 %	2	24	2	0,36	0,32
3	25	10	40 %	2	37	2	0,33	0,47
4	17	13	40 %	2	18	2	0,48	0,32
5	25	13	40 %	2	27	2	0,46	0,46
6	33	13	40 %	2	36	2	0,45	0,6
7	10	8,5	60 %	2	11	2	0,49	0,13

1.5.2. Calcul de la durée et de la consommation en eau et en gaz d'un batch de blanchiment de gombo

Pour chaque modèle, la capacité, la puissance du bruleur et l'efficacité ont été utilisées pour estimer la durée, la consommation en eau et la consommation en butane d'un batch de blanchiment de gombo.

Pour simplifier le problème, le temps et la consommation en gaz nécessaires pour chauffer de l'eau et de l'espace de tête ont été considérés comme négligeables. Le blanchiment a donc été modélisé comme une succession de 4 phases :

- i. Chargement de la cuve (ouverture du couvercle et introduction du panier de gombo) pendant $t_{load} = 1$ min
- ii. Chauffage du gombo de $T_0 = 25^\circ\text{C}$ jusqu'à $T_{blanch} = 95^\circ\text{C}$ pendant t_{heat}
- iii. Maintien à T_{blanch} pendant $t_{hold} = 2$ min
- iv. Déchargement de la cuve (ouverture du couvercle, retrait du panier de gombo et ajout d'eau) pendant $t_{unload} = 1$ min

Détermination de la puissance perdue par les parois pendant les 4 phases

Pour chaque modèle, la puissance perdue par les parois et le couvercle de la cuve de blanchiment Φ_{loss} (kW) pendant les 4 phases a été calculée de la façon suivante :

$$\Phi_{loss} = S \times h_{wall-air} \times (T_{wall} - T_{air}) \text{ (eq. A. 1)}$$

Avec :

- S : la surface des parois et du couvercle de la cuve (en m^2)
- $h_{wall-air}$: le coefficient de transfert convectif entre les parois et le couvercle de la cuve et l'air ambiant ($0.015 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
- T_{wall} : la température de la paroi qui correspond à celle du barème de blanchiment (95°C)
- T_{air} : la température de l'air ambiant (25°C)

Détermination du temps nécessaire pour chauffer le gombo jusqu'à 95°C (phase ii)

Pendant la phase (ii), le flux de vapeur généré condense à 100°C sur le gombo pour le chauffer. Pendant cette phase, la température du gombo est inférieure à la température de blanchiment donc on considère que les pertes en vapeur sont nulles et que toute la puissance injectée par le bruleur (Φ_{in}) est consommée pour chauffer le gombo (Φ_{heat}^{okra}) et dissipée en pertes par les parois (Φ_{loss}^{wall}). Par conséquent:

$$\Phi_{in} = \Phi_{heat}^{okra} + \Phi_{loss}^{wall} \quad (eq. A. 2)$$

Or on peut écrire Φ_{in} et Φ_{heat}^{okra} de la façon suivante :

$$\Phi_{in} = \Phi_{burn} \times \eta_{blanch} \quad (eq. A. 3)$$

$$\Phi_{heat}^{okra} = \frac{m_{okra} \times c_{p_{okra}} \times (T_{blanch} - T_0)}{t_{heat}} \quad (eq. A. 4)$$

Avec :

- Φ_{burn} : la puissance du bruleur de la cuve de blanchiment (en kW)
- η_{blanch} : le rendement global de la cuve de blanchiment (en %)
- m_{okra} : la masse de gombo (en kg) dans de la cuve de blanchiment
- $c_{p_{okra}}$: la capacité thermique massique du gombo à 25°C (3.70 kJ·kg⁻¹·K⁻¹).
- t_{heat} : le temps nécessaire (en secondes) pour chauffer le gombo de T_0 jusqu'à T_{blanch} .

En combinant les 3 équations ci-dessus, on obtient :

$$t_{heat} = \frac{m_{okra} \times c_{p_{okra}} \times (T_{blanch} - T_0)}{\Phi_{in} - \Phi_{loss}^{wall}} \quad (eq. A. 5)$$

Détermination de la durée d'un batch de blanchiment (t_{blanch})

La durée totale d'un batch de blanchiment t_{blanch} dans le blancheur était donc estimée comme suit :

$$t_{blanch} = t_{heat} + t_{hold} \quad (eq. A. 6)$$

Détermination de la quantité d'eau consommée par batch ($m_{water/batch}$)

Pour estimer la quantité d'eau consommée pendant un batch de blanchiment ($m_{water/batch}$), l'hypothèse a été faite qu'elle correspond à la quantité de vapeur perdue m_{loss}^{vap} .

- pendant que le couvercle est ouvert pour charger (phase i; $t_{load} = 1$ min) et décharger (phase iv; $t_{unload} = 1$ min) le panier et
- pendant que le gombo est maintenu à 95°C (phase iii). En effet, nous considérons qu'en l'absence de régulation, toute la puissance fournie pendant cette phase permet de compenser les pertes de chaleur par les parois (Φ_{loss}^{wall}) et les pertes de vapeur (Φ_{loss}^{vap}).

Par conséquent, pendant les phases i, iii et iv on peut écrire :

$$\Phi_{in} = \Phi_{loss}^{vap} + \Phi_{loss}^{wall} \quad (eq. A. 7)$$

Or :

$$\Phi_{loss}^{vap} = \dot{m}_{loss}^{vap} \times Lv_{100^{\circ}C} \quad (eq. A. 8)$$

Avec \dot{m}_{loss}^{vap} le débit de vapeur perdue ($kg \cdot s^{-1}$)

Donc :

$$\dot{m}_{loss}^{vap} = \frac{\Phi_{in} - \Phi_{loss}^{wall}}{Lv_{100^{\circ}C}} \times (t_{load} + t_{hold} + t_{unload}) \quad (eq. A. 9)$$

Avec :

- \dot{m}_{loss}^{vap} : la consommation de vapeur d'eau par batch (en kg)
- $Lv_{100^{\circ}C}$: la chaleur latente de vaporisation de l'eau à $100^{\circ}C$ ($2256 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Détermination de la quantité de butane consommée par batch ($m_{gas/batch}$)

En faisant l'hypothèse que le bruleur est allumé en continu, la consommation en butane par batch de blanchiment (en $kg/batch$) a été estimée avec la formule suivante :

$$m_{gas/batch} = \frac{\Phi_{burn}}{HHV_{butane}} \times (t_{load} + t_{heat} + t_{hold} + t_{unload}) \quad (eq. A. 10)$$

Avec HHV_{butane} le pouvoir calorifique inférieur du butane ($49\,400 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.6. Broyage

Les caractéristiques des 7 modèles de cutters correspondant à la variable de conception e_{cutter} sont présentés dans le tableau A.9. Les tableaux A.10 et A.11 présentent celles des 3 modèles de broyeurs à couteaux et des 5 modèles de grinder-cutter qui étaient possibles pour la variable de conception e_{grind} . Ces 5 modèles avaient la particularité de pouvoir fonctionner en mode râpe (pour l'ananas) ou en mode cutter (pour le gombo).

Pour tous les modèles de cutter et grinder cutter en configuration cutter, l'hypothèse a été faite que les durées de broyage, de chargement et déchargement sont indépendante de la capacité de l'équipement considéré.

Tableau A. 9 : Caractéristiques des cutters simples et sous-vide possibles pour la variable e_{cutter} .

Equipment type	Model ID	Weight (kg)	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Capacity (kg / batch)	Duration (min / batch)	Active electric power (kW)	Equipment EXW Price (€ excl. Tax)	Accessories EXW Price (€ excl. Tax)*
Vacuum Cutter	1	48	500	305	560	3	3	0,75	9478	200
	2	58	540	350	650	8	3	1,2	11538	200
	3	230	910	750	1620	18	3	10	17252	200
Cutter	4	17	247	407	303	2,5	3	0,5	1683	177
	5	25	256	415	482	4,5	3	1	1637	186
	6	23	256	415	482	5,5	3	1,3	2346	229
	7	27	256	422	522	7	3	1,5	2913	252

* : jeu de couteaux supplémentaire.

Tableau A. 10 : Caractéristiques des grinders et des grinder-cutters possibles pour la variable e_{grind}

Equipment type	Model ID	Weight (kg)	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Active electric power (kW)	Equipment EXW Price (€ excl. Tax)	Accessories EXW Price (€ excl. Tax)
Grinder Cutter	1	33,4	380	350	700	1,5	3165,38	93,49
	2	16	220	360	420	0,37	1160	112
	3	30,5	252	485	505	1	2703	260
	4	30,5	252	485	505	1,3	3322	293
	5	31	252	485	505	1,5	3627	333
Grinder	6	31	500	500	1300	2,2	850	0
	7	60	550	520	1530	2,2	2500	0
	8	50	760	670	1610	1,5	3700	0

Pour les grinders qui peuvent fonctionner en continu, le débit a été converti en kg/min. Comme le chargement peut se faire au fur et à mesure que le produit est broyé, le temps nécessaire a été considéré comme nul. Par contre, pour le déchargement, nous avons considéré qu'1 min était nécessaire pour changer la bassine recevant la purée.

Tableau A. 11 : Capacité des grinders simples et des grinder cutters selon leur configuration

Equipment type	Model ID	Cutter Configuration				Grinder Configuration			
		Capacity (kg/batch)	Duration (min / batch)	Loading time (min/batch)	Unloading time (min/batch)	Capacity (kg/batch)	Duration (min / batch)	Loading time (min/batch)	Unloading time (min/batch)
Grinder Cutter	1	3,8	3	1	1	4,17	1	0	1
	2	1	3	1	1	4,17	1	0	1
	3	2	3	3	3	9,17	1	0	1
	4	2,5	3	3	3	9,17	1	0	1
	5	3,5	3	3	3	9,17	1	0	1
Grinder	6	NA	NA	NA	NA	16,67	1	0	1
	7	NA	NA	NA	NA	16,67	1	0	1
	8	NA	NA	NA	NA	10,83	1	0	1

1.7. Dépulpage

Les caractéristiques des 8 modèles de dépulpeuses qui étaient possibles pour la variable e_{pulp} sont présentées dans le tableau A.12. Pour tous les modèles, le coût des accessoires était considéré comme nul.

Pour convertir leur débit, nous avons considéré que chaque batch de dépulpage correspond au temps nécessaire pour traiter la pulpe de mangue contenue dans une cuve de transfert (28 kg). Comme le chargement peut se faire au fur et à mesure que le produit est dépulpé, le temps nécessaire a été considéré comme nul. Par contre, pour le déchargement, nous avons considéré que 3 min étaient nécessaires pour changer la bassine recevant la purée de mangue.

Tableau A. 12 : Caractéristiques des dépulpeuses associées à la variable e_{pulp}

Equipment type	Model ID	Weight (kg)	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Capacity (kg / batch)	Duration (min / batch)	Active electric power (kW)	Equipment EXW Price (€ excl. Tax)	Loading time (min / batch)	Unloading time (min / batch)
Pulper single channel	1	21	610	360	540	28	33,6	0,65	2030	0	3
	2	45,9	1030	400	860	28	15,3	0,9	3740	0	3
	3	54,3	1030	400	860	28	12,4	1,8	5015	0	3
	4	100	1700	820	1700	28	4,2	3	5300	0	3
	5	200	1700	820	1700	28	1,7	5,5	8500	0	3
	6	200	1173,6	647	1040	28	13,4	2,2	15400	0	3
	7	270	1310	660	1390	28	1,7	4	8990	0	3

1.8. Pressurage

Les caractéristiques des 3 modèles de presses à paquets qui étaient possibles pour la variable e_{press} sont présentées dans les tableaux A.13 et A.14. Pour tous les modèles, le coût des accessoires était considéré comme nul.

Tableau A. 13 : Caractéristiques générales des presses à paquets possibles pour la variable e_{press}

Family	Equipment type	Model ID	Weight (kg)	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Active electric power (kW)	EXW Price excl. Tax of the equipment (€)
Press	Packet press	1	160	1010	990	1430	1,1	3900
		2	270	1260	1240	1510	1,5	4900
		3	300	2010	1240	1510	1,5	5800

Pour chaque modèle, la capacité, les durées de chargement, de pressurage et de déchargement ont été estimées à partir du débit horaire et du nombre de piles et de plateaux indiqués par le fabricant (tableau A.13).

Les durées de chargement t_{load}^k et de déchargement t_{unload}^k des presses sont calculées à partir du nombre de paquets, en considérant que les temps de chargement et de déchargement d'un paquet sont de 50 s et 20 s respectivement. Pour le modèle n°3, la durée de chargement était considérée comme nulle car les 2 plateaux permettent de monter les piles pendant que la presse est en fonctionnement.

La capacité par batch de chaque modèle m_{batch} (en kg) était estimée avec la formule suivante :

$$m_{batch} = w_{pack}^2 \times h_{pack} \times n_{pack} \times \rho_{food} \quad (eq. A. 11)$$

Avec:

- w_{pack} : la largeur d'une claie (en m)
- h_{pack} : la hauteur d'un paquet ($5 \cdot 10^{-2}$ m).
- n_{pack} : le nombre de couches par batch.
- ρ_{food} : la masse volumique de la pulpe de fruit à presser ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Pour chaque type de presse, le temps de pressurage par batch t_{press} qui permet d'obtenir le débit (entrant) indiqué par le fabricant \dot{m}_{press} ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) pouvait alors être calculé comme suit :

$$t_{press} = \frac{60 \times m_{batch}}{\dot{m}_{press}} - t_{load} - t_{unload} \quad (eq. A. 12)$$

Tableau A. 14 : Capacité et durée de batch des presse à paquets possibles pour la variable e_{press}

Abbreviation	n_{tray}	w_{pack}	n_{pack}	\dot{m}_{press}	m_{batch}	t_{press}	t_{load}	t_{unload}
Model ID	Number of press trays	Width of a pile (mm)	Number of packing piles	Manufacturer indicative yield (kg / h)	Capacity (kg / batch)	Duration (min / batch)	Loading time (min / batch)	Unloading time (min / batch)
1	1	389,5	7	150	50	12	6	2
2	1	480	9	300	100	10	8	2
3	2	480	9	600	100	10	0	2

1.9. Homogénéisation

Parmi les 8 modèles de cuves d'homogénéisation qui étaient possibles pour la variable e_{homo} (tableaux A.15), 3 modèles étaient équipées d'un module d'agitation et pouvaient être mises sous vide tandis que 5 modèles étaient des cuves cylindro-coniques sans option vide. Dans ces dernières le mélange devait être effectué manuellement à l'aide d'une spatule.

Tableau A. 15 : Caractéristiques des cuves d'homogénéisation associées à la variable e_{homo}

Equipement type	Model ID	Weight (kg)	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Active electric power (kW)	Equipment EXW Price (€ excl. Tax)
Homogeniser under Vacuum	1	40	500	500	1200	2	13400
	2	50	500	500	1200	2	15420
	3	60	500	500	1200	2	16835
Homogenising Vat	4	15	400	400	1400	0	1119
	5	20	400	400	1525	0	1219
	6	25	400	400	1645	0	1259
	7	40	500	500	1514	0	1359
	8	55	500	500	1764	0	1390

Le tableau A.16 synthétise les éléments utilisés pour estimer le temps de mélange. Dans le cadre de ce travail, pour simplifier le problème, les conditions physico-chimiques des fluides à mélanger sont supposées identiques.

Le temps de chargement des cuves d'homogénéisation a été estimé en considérant qu'il fallait 5 min pour charger la cuve, réaliser les mesures nécessaires (pH, degré Brix) et ajouter les ingrédients éventuels (eau, sucre, jus de citron). Le temps de déchargement est nul car il était compris dans le temps de transfert entre la cuve et la trémie de la doseuse.

Tableau A. 16 : Extrapolation et estimation des temps de mélange des différentes cuves d'homogénéisation associés à la variable e_{homo}

Abbreviation		m_{batch} (kg / batch)	V (m ³)	F	P/V (kW / m ³)	P (kW)	N (s ⁻¹)	k'	t_M (min / batch)	t_{load} (min / batch)	t_{unload} (min / batch)
Equipement type	Model ID	Capacity	Volume of product in the vat	Scaling factor	Power / stirred volume	Power of the stirrer	Stirrer rotation speed	Constant depending on the type of stirrer	Duration	Loading time	Unloading time
Homogeniser under Vacuum	1	25	0,025	0,794	50,4	1,26	3,78	720	3,2	5	0
	2	35	0,035	0,888	45	1,58	3,38		3,6	5	0
	3 (ref)	50	0,050		40	2	3		4	5	0
Homogenising Vat	4 (ref)	45	0,045		4,4	0,2	0,5	180	6	5	0
	5	60	0,060	1,101	4	0,24	0,45		6,6	5	0
	6	75	0,075	1,186	3,7	0,28	0,42		7,1	5	0
	7	120	0,120	1,387	3,2	0,38	0,36		8,3	5	0
	8	170	0,170	1,557	2,9	0,49	0,32		9,3	5	0

Les conditions et les temps de mélange des modèles n°1 et 2 d'une part, et des modèles n°5, 6, 7 et 8 d'autres part, ont été extrapolées à partir de conditions de mélange définies pour un modèle de référence par type de cuve :

- Pour les modèles disposant d'un mobile d'agitation et l'option vide, le modèle de référence était le modèle n°3. Pour ce modèle, nous avons considéré que la puissance du moteur était maximale ($P_{ref} = 2$ kW), que la vitesse de rotation de l'agitateur était de $180 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ ($N_{ref} = 3 \text{ tr}\cdot\text{s}^{-1}$) et que le temps de mélange (t_{Mref}) était de $4 \text{ min}\cdot\text{batch}^{-1}$.
- Pour les modèles cylindroconique pour lesquels le mélange doit être effectué manuellement, le modèle de référence était le modèle n°4. Pour ce modèle, nous avons considéré que la puissance était le double de celle d'un homme au repos ($P_{ref} = 0.2$ kW), que la vitesse de rotation de la spatule était de $30 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$ ($N_{ref} = 0.5 \text{ tr}\cdot\text{s}^{-1}$) et que le temps de mélange (t_{Mref}) était de $6 \text{ min}\cdot\text{batch}^{-1}$. Selon cette hypothèse, la puissance nécessaire pour mélanger la cuve n°8 correspond à la puissance que peut développer un homme lorsqu'il travaille (0.5 kW).

Pour extrapoler, nous avons considéré que le système d'agitation est en régime turbulent et et que la vitesse périphérique du mobile d'agitation (V_p en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) est constante (similitude cinématique) lorsque l'on passe du système d'agitation du modèle de référence au système d'agitation du modèle m. Par conséquent, on peut écrire les équations suivantes (Roustan et al., 1999) :

$$F = \sqrt[3]{V/V_{ref}} \quad (\text{eq. A. 13})$$

$$\frac{P}{V} = \frac{P_{ref}}{V_{ref}} \times F \quad (\text{eq. A. 14})$$

$$N = N_{ref} \times F \quad (\text{eq. A. 15})$$

Avec :

- F: le facteur de mise à l'échelle (sans dimensions)
- V et V_{ref} : le volume de liquide contenu dans le modèle m et le modèle de référence (en m³)
- P et P_{ref} : la puissance d'agitation dans le modèle m et dans le modèle de référence (en W)

- N et N_{ref} : la fréquence de rotation du mobile d'agitation dans le modèle m et dans la cuve de référence (en s^{-1})

Le temps de mélange est le « *temps nécessaire à l'obtention d'un mélange de qualité fixée dans des conditions d'agitations déterminées* » (Roustan et al., 1999). Il est fonction des conditions d'agitation, du système cuve-agitation et des caractéristiques physico-chimiques des fluides à mélanger. En régime turbulent, pour chacun des deux systèmes de référence et les systèmes géométriquement semblables, l'analyse dimensionnelle permet d'écrire que :

$$N_{ref} \times t_{M_{ref}} = k' \quad (eq. A. 16)$$

Avec k' une constante dépendant du type de mobile et qui est donc identique pour tous les modèles d'un même type. Une fois la valeur de k' déterminée pour la cuve de référence, elle peut être utilisée dans l'équation ci-dessus pour extrapoler quel sera le temps de mélange (en s) dans le modèle m :

$$t_M = \frac{k'}{N} \quad (eq. A. 17)$$

1.10. Remplissage

Les caractéristiques des 12 modèles de doseuses pneumatiques qui sont possibles pour la variable e_{fill} sont synthétisées dans le tableau A.17. En plus de la fonction de dosage-remplissage, les 2 modèles de type « Filler-screwler » permettent de visser les bouchons des bouteilles twist-off de 1 L. A noter que le prix des 4 modèles de doseuses sur table comprend celui de la table (modèle identique à celui utilisé pour le triage-parage) sur laquelle elle doivent être positionnées pour fonctionner.

Tous les modèles disposent d'une trémie d'alimentation. Le temps de remplissage de cette trémie était pris en compte dans le temps de transfert de la pompe qui connecte la cuve d'homogénéisation et la doseuse.

Tableau A. 17 : Caractéristiques des modèles de doseuses-remplisseuses associés à la variable e_{fill}

Equipement type	Model ID	Set up	Weight (kg)	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Hopper capacity (L)	Active electric power (kW)	Equipment EXW Price (€ excl. Tax)
Filler-screwler	1	Floor-mounted frame	50	400	400	1600	15	0	11340
	2		70	550	500	1600	30	0	11510
Simple Filler	3		100	1200	800	1100	60	0	8800
	4		110	1200	1555	1528	150	0	11600
	5		60	350	350	1700	20	0,1	4696
	6		55	430	1220	1520	25	0	3285
	7		120	1272	1100	1450	50	0	11400
	8		120	1272	1100	1450	120	0	12200
	9	Table-top filling machine	30	450	300	800	15	0,5	8125
	10		35	500	750	700	30	0	6145
	11		40	600	900	1100	30	0	6555
	12		35	430	995	650	20	0	7333

Les durées de cycle qui ont été estimées en fonction du type de doseuse (doseuse simple ou doseuse-remplisseuse) sont synthétisées dans le tableau A.18. Le temps de manutention était identique pour tous les produits finis (2 s / unit). La durée de remplissage variait en fonction du volume de l'emballage et du type de produit fini (liquide ou purée). Pour les 2 doseuses-visseuses un temps de vissage a été ajouté pour les bouteilles twist-off de 1L afin de prendre en compte que ces équipements permettaient de réaliser les opérations de remplissage et de vissage (des bouchons).

Tableau A. 18 : Durée d'un cycle pour les doseuses simples et pour les doseuses-visseuses.

Packaging	Handling time (s / unit)	Filling time (s / unit)	Screwing time (s / unit)	Total duration (s / unit)	
				Simple Filler	Filler-screwler
330 ml glass bottles	3	3	-	6	6
1000 ml glass bottles	3	4	3	7	10
500 g stand up pouches	3	4	-	7	7
1000 g stand up pouches	3	6	-	9	9

1.11. Sealing and capping

Le tableau A.19 synthétise les caractéristiques :

- Des 2 modèles de thermoscelleuse sous vide étaient possibles pour sceller les sachets souples (variable e_{vac}),
- Du modèle de capsuleuse manuelle permettant de sceller les bouteilles de 33 cl,
- Du modèle de visseuse permettant de visser les bouchons sur les bouteilles twist-off de 1 L (fonction disponible pour les 2 modèles de doseuses-visseuses présentées dans le tableau A.17).

Pour les thermoscelleuses, le nombre de poches par batch a été déterminé en tenant compte des dimensions des sachets et de celles de la barre de soudure et de la chambre des thermoscelleuses. Il est identique pour les 2 modèles et les 2 formats de sachets. La durée de l'opération unitaire était de 45 s / batch, ce qui correspond à :

- 35 secondes à la machine pour mettre sous vide et thermosceller les sachets,
- 5 secondes pour charger et pour décharger

Pour les capsuleuses et les visseuses, la durée de l'opération de scellage des bouteilles était de 9 s/batch soit 3 secondes pour charger, sceller, et décharger chaque bouteille.

Tableau A. 19 : Caractéristiques des 2 modèles de thermoscelleuses possibles pour sceller les sachets souples (variable e_{vac}) et de la capsuleuse et de la visseuse possibles pour sceller les bouteilles (les dimensions indiquées ne prennent pas en compte les dimensions de la table sur laquelle ils doivent reposer).

Family & Equipement type	Model ID	Weight (kg)	Width (mm)	Depth (mm)	Height (mm)	Capacity (number of pouches / batch)	Active electric power (kW)	Equipement EXW Price (€ excl. Tax)
Vacuum sealer	1	79	581	480	0	2	0,75	4180
	2	72	493	616	0	2	0,75	4225
Crown capper	1	8,7	239	262	535	1	0	119
Screw capper	1	10	300	440	800	1	0	1750

1.12. Stabilisation thermique

1.12.1. Caractéristiques des modèles d'autoclaves

Les caractéristiques nominales et estimées des 13 modèles d'autoclaves associés à la variable e_{auto} sont présentées dans les tableaux A.20, A.21 et A.22.

Pour tenir compte du fait qu'en fonction du mode de chauffe des autoclaves, leur vitesse de montée en température et leur consommations d'eau et d'énergie différaient, les 13 modèles ont été divisés en 4 types :

- Les autoclaves à immersion (3 modèles) : pendant la phase de chauffe, les mouvements d'eau à l'intérieur de l'enceinte se font par convection naturelle, ce qui peut conduire à des températures non-homogènes.
- Les autoclaves avec circulation d'eau (7 modèles) : ces modèles sont équipés d'une pompe de circulation qui aspire l'eau chaude en bas et la réinjecte sur la partie supérieure de façon à créer de la convection forcée et homogénéiser la température à l'intérieure de l'enceinte.
- Les autoclaves avec aspersion d'eau (2 modèles) : ces modèles disposent d'une pompe de circulation et d'une « douche d'aspersion ». La douche de circulation permet à l'autoclave de fonctionner en aspersion et de réduire les quantités d'eau et d'énergie qui sont nécessaires pendant les phases de chauffage et de refroidissement.
- les autoclaves à vapeur (1 seul modèle¹) : ce modèle horizontal vapeur-air utilise de la vapeur, générée par un générateur de vapeur qui fonctionne au gaz, et qui circule dans l'enceinte grâce à un système de ventilation.

Pour tous les modèles d'autoclave un opérateur était affecté à temps plein au pilotage et au contrôle de l'autoclave. Pendant que l'autoclave fonctionnait, une partie de son travail consistait à placer les emballages dans les paniers au fur et à mesure où ils étaient scellés lors de l'étape précédente. Quel que soit le modèle, 10 min étaient nécessaires pour charger le panier dans l'autoclave. Lorsque le cycle était terminé, 10 min étaient nécessaires pour décharger le panier et le sortir du container.

¹ La plupart des modèles d'autoclaves à vapeur pour lesquels des devis ont été obtenus étaient très onéreux. Surtout, leurs dimensions n'étaient pas compatibles avec leur positionnement à l'intérieur d'un container.

Tableau A. 20 : Types et dimensions des modèles d'autoclaves associés à la variable e_{auto}

Equipement type	Model ID	Weight (kg)	Autoclave width (mm)	Autoclave depth (mm)	Autoclave height (mm)	Basket width (mm)	Basket depth (mm)	Basket floor area ^c (m ²)	Internal volume of the autoclave chamber (L)
Gas vertical autoclave with water immersion	1	95	650	650	1210	0	0	0	105
	2	450	1200	1475	2265	650	650	0,42	337
	3	450	1300	1610	2340	750	750	0,56	447
Gas vertical autoclave with water circulation	4	350	890	1440	2220	635	635	0,4	240
	5	450	1200	1475	2265	650	650	0,42	337
	6	450	1300	1610	2340	750	750	0,56	447
	7	250	1000	1000	1790	595	595	0,35	225
	8	250	1100	1100	2150	650	650	0,42	365
	9	250	1100	1100	2150	650	650	0,42	365
	10	510	1200	1200	2300	740	740	0,54	520
Gas vertical autoclave with water spraying	11	220	1300	1500	2010	587	587	0,34	285
	12	300	1300	1650	2230	740	740	0,54	520
Horizontal steam autoclave	13	1390 ^a	2750 ^a	1700 ^b	2200 ^b	580	900	1,02	NA

^a : Le poids et la largeur indiquée correspond à la somme de celle de l'autoclave et de la chaudière.
^b : La profondeur et la hauteur indiquées correspondent à la valeur maximale entre celle de l'autoclave et celle de la chaudière.
^c : Pour les autoclaves verticaux, la surface au sol des paniers était calculée en les assimilant à des carrés. Pour l'autoclave horizontal, la surface des paniers comprend la surface occupée par la chaudière.

Tableau A. 21 : Capacités et consommation d'eau des modèles d'autoclaves associés à la variable e_{auto}

Model ID	Capacity (number of unit / batch)					Volume of water required		
	4/4 cans	330 ml bottles	1000 ml bottles	330 g stand-up pouches	1000 g stand-up pouches	for the coming up phase (L)	to cool down the products from 125 to 45 °C (L)	for the coming down and cooling phase (L/°C)
1	68	92	26	25	14	38	349	4,36
2	180	243	70	66	36	157	1122	14,01
3	246	321	98	88	54	201	1485	18,58
4	140	154	74	88	40	101	798	9,98
5	180	243	70	66	36	157	1122	14,01
6	246	321	98	88	54	201	1485	18,58
7	100	160	49	44	27	123	748	9,35
8	150	243	70	66	36	211	1215	15,17
9	150	243	70	66	36	211	1215	15,17
10	200	321	98	88	54	312	1728	21,61
11	124	210	66	98	50	65	622	7,77
12	240	327	159	221	108	92	1085	13,56
13	250	420	126	132	80	NA	1700	19,77

Tableau A. 22 : Caractéristiques énergétiques et prix des modèles d'autoclaves associés à la variable e_{auto}

Model ID	Burner power (kW)	Burner efficiency (%)	Insulation of autoclave walls	Average heating speed (°C / min)	Butane consumption (kg / h)	Active electric power (kW)	Equipment EXW Price ^a (€ excl. Tax)	Accessories EXW Price ^b (€ excl. Tax)
1	22	0,5	FALSE	1	1,6	0,2	10252	0
2	51	0,5	TRUE	1,5	3,72	1	33540	6107
3	103	0,5	TRUE	2,5	7,51	1	33920	7720
4	28	0,5	TRUE	1,5	2	2	32800	5376
5	51	0,5	TRUE	2	3,72	2,5	33540	6107
6	103	0,5	TRUE	3	7,51	2,5	33920	7720
7	64	0,5	TRUE	3	4,66	0,1	26253	3510
8	64	0,5	TRUE	2	4,66	0,1	27535	4748
9	124	0,5	TRUE	3,5	9,01	0,1	27835	4748
10	124	0,5	TRUE	2,5	9,01	0,1	29085	5304
11	50	0,5	TRUE	3,5	3,64	1	42993	3150
12	104	0,5	TRUE	4,5	7,59	2	45373	4318
13	243	0,82	TRUE	5	17,6	4,5	71820	6778

^a : Le prix de l'équipement comprend un système de régulation, 2 paniers et 2 chariots (à l'exception du modèle n° 1 pour lesquels les paniers et les chariots n'étaient pas disponibles et du modèle n°4 pour lequel le chariot n'était pas disponible). Pour l'autoclave n°13, le prix comprend celui de la chaudière à gaz.

^b : Le prix des accessoires comprend 3 jeux d'intercalaires et de supports (nécessaire pour empiler les emballages dans l'autoclave). Pour l'autoclave n°13

1.12.1.1. Estimation des consommations en eau

Le tableau A.21 présente quelles sont les consommations en eau des différents modèles d'autoclaves.

Pour la phase de montée en température, la quantité d'eau consommée dépendait du type d'autoclave :

- Pour les autoclaves à immersion et avec circulation d'eau, le volume d'eau nécessaire correspond au volume restant dans la cuve après déduction du volume occupé par l'air et les intercalaires (5% du volume de l'enceinte) et par les boîtes 4/4 (diamètre = 99 mm; hauteur = 118 mm).
- Pour les autoclaves avec aspersion d'eau, la quantité d'eau consommée était une donnée fournie par le fabricant.
- Pour l'autoclave à vapeur, nous avons considéré que la quantité d'eau consommée correspondait à la quantité de vapeur nécessaire pour chauffer le produit jusqu'à la température du barème.

Pour la phase de refroidissement, les quantités d'eau nécessaires pour refroidir les produits de 125 à 45 °C avec les autoclaves à vapeur et à aspersion étaient fournies par les fabricants. Pour les 2 autres types de modèles (autoclaves à immersion et autoclaves avec circulation), nous avons considéré qu'il fallait 3.5 fois le volume occupé par les produits et l'eau de chauffage pour refroidir les produits de 125 à 45 °C avec une eau à 25 °C. La quantité d'eau nécessaire pour refroidir l'intérieur de l'enceinte d'un degré en a été déduite ce qui permet de prédire la consommation d'eau de refroidissement pour d'autres température de stérilisation.

Pendant le reste du cycle, les pertes en eau liées au dégagement de vapeur (dégazage notamment) ont été négligées.

1.12.1.2. Calcul de la vitesse de montée en température des autoclaves

Pour l'autoclave à vapeur pour lequel la vitesse de montée en température pouvait varier entre 1 et 10 °C / min, nous avons considéré une vitesse intermédiaire (5 °C / min).

Pour les autres types d'autoclaves, la vitesse de montée en température moyenne a été estimée en faisant la moyenne (arrondie à 0.5 °C/min) entre les vitesses de montée en température minimales et maximales du modèle:

- La vitesse de montée en température minimale était calculée en considérant l'énergie à apporter pour chauffer d'1°C l'eau de chauffage et les produits contenus dans l'autoclave et en tenant compte de la puissance du bruleur de l'autoclave (cf tableau A.22), de son rendement énergétique (pour tous les modèles, nous avons considéré que 50% de la chaleur de combustion était transférée à l'enceinte) et du rendement énergétique de l'autoclave (80% sans calorifugeage, 90% avec calorifugeage)
- La vitesse de montée en température maximale était calculée de la même façon mais en considérant que l'autoclave ne contenait que l'eau de chauffage.

1.12.1.3. Calcul de la consommation en gaz

La consommation en gaz de l'autoclave (en kg/h) était calculée en tenant compte de la puissance du bruleur (en kW, cf tableau A.22) et du pouvoir calorifique inférieur du butane $HHV_{\text{butane}} = 49\,400 \text{ kJ/kg}$.

La quantité de butane qui était consommée par batch était calculée en considérant :

- Que le bruleur fonctionnait à 100 % de sa puissance pendant la phase de montée en température jusqu'à la température du barème (T_{hold}^p). Le temps de montée en température était calculé à partir de la vitesse de montée en température.
- Que le bruleur fonctionnait à 20 % de sa puissance pendant la phase de maintien en température. Le temps de maintien en température (t_{hold}) était estimé en fonction de T_{hold}^p et de P_0^p ou de F_0^p cible.

1.12.2. Modélisation du traitement thermique

Un modèle global, qui combine les transferts de chaleur au sein des produits et l'évolution de leur qualité sanitaire a été développé. Une appréciation simplifiée de l'impact sur les qualités nutritionnelles et sensorielle des produits a été retenue à partir des cinétiques de dégradation thermiques disponibles dans la littérature.

1.12.2.1. Présentation des différentes phases du traitement thermique

Comme illustré sur la figure A.1, pour chaque produits et chaque autoclave l'évolution de la température au sein de l'autoclave est modélisée comme une succession de quatre phases :

- Phase de « coming up » d'une durée t_{CUP} où S_{CUP} correspond à la vitesse de montée en température.
- Phase de maintien à température (holding time) d'une durée t_{hold} .
- Phase de « coming down » d'une durée T_{CDP} où la température de l'enceinte diminue jusqu'à la température de l'eau de refroidissement ($T_{\text{cool}} = 25^\circ\text{C}$). Pour tous les modèles d'autoclaves, la vitesse de descente en température S_{CDP} était de $4^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.
- Phase de palier de refroidissement à T_{cool} pendant t_{cool} jusqu'à ce que la température à cœur du produit atteigne une valeur de 45°C .

Pour chaque format d'emballage, aliment et autoclave le traitement thermique est simulé. Les durées des différentes phases sont définies dans le respect de la valeur létale (F_0 ou P_0) souhaitée (à cœur) et permettent d'évaluer la durée totale d'un batch dans l'autoclave t_{stab} . La température dans l'autoclave autour des produits est supposée homogène quel que soit le modèle d'autoclave.

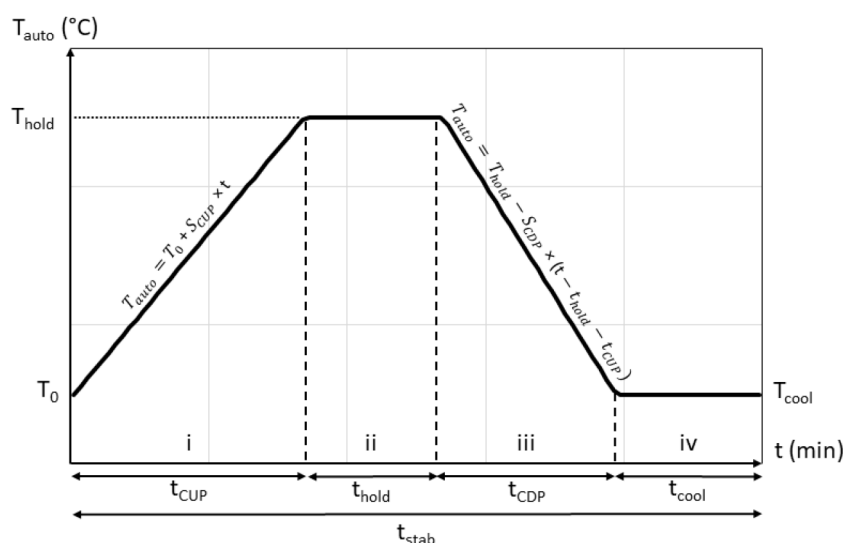


Figure A. 1 : Représentation graphique de la température au sein de l'autoclave en fonction du temps avec 4 phases du traitement thermique : i. Coming up phase, ii. Holding phase, iii. Coming down phase, iv. Cooling phase.

1.12.2.2. Géométrie de l'emballage

Les dimensions des différents emballages, bouteilles et les stand up pouches, sont présentées dans le tableau A.23. La géométrie des purées et jus traités suit une forme cylindrique avec un rétrécissement au niveau de l'ouverture (cf. figure A.2). Dans cette étude, il a été supposé que pour les jus de fruits les mouvements de convection étaient tels que la température en tout point du liquide est considérée homogène. Pour les purées, le gradient de température dans le produit conditionné est pris en compte.

Tableau A. 23 : Dimensions des emballages utilisées pour la modélisation

	Glass bottle		Stand up pouch	
	330ml	1000ml	500g	1000g
Capacity	330ml	1000ml	500g	1000g
Height (mm)	199.8	254.5	186	259
Diameter (mm)	60,5	88,3	58	70

Les géométries ont été modélisées dans un espace en 2D (r,z) axisymétrique (cf. figure A.2). Pour les produits conditionnés en stand up pouches, le produit liquide remplit la totalité de l'espace. Pour les produits conditionnés en bouteilles, un espace de tête contenant de l'air a été pris en compte. Le point froid, auquel la valeur pasteurisatrice/stérilisatrice était calculée, a été positionné sur l'axe de symétrie au 1/3 inférieur de l'aliment.

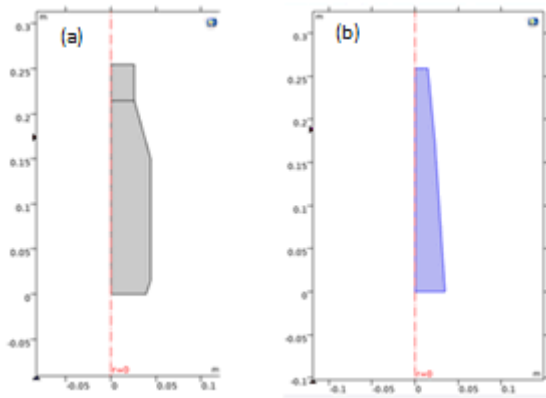


Figure A. 2 : Schematic view (not to scale) of the bottles (a) and the stand-up pouches (b) computational domain 2D.

1.12.2.3. Modélisation des transferts de chaleur

L'équation différentielle de la conduction thermique dans un axi-symétrique bidimensionnel s'exprime comme suit :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \cdot \vec{\nabla} T) = 0 \quad (\text{eq. A. 18})$$

Avec ρ la densité massique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_p la chaleur spécifique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) et k la conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Avec comme condition initiale :

$$T = T_0 \text{ at } t=0, \forall r, \forall z \quad (\text{eq. A. 19})$$

Et avec comme conditions aux limites (en raison de l'axe de symétrie):

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ at } r=0, \forall z \quad (\text{eq. A. 20})$$

Du fait du transfert convectif entre la surface du produit et la vapeur d'eau :

$$-k \nabla T = h(T - T_\infty) \quad (\text{eq. A. 21})$$

Avec h ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) le coefficient de transfert de chaleur global sur la surface du produit et T_∞ est la température de la vapeur d'eau environnante.

Le système d'équations est résolu par la Méthode des Eléments Finis en utilisant le logiciel commercial COMSOL Multiphysics™ (version 5.3, COMSOL Inc., Stockholm, Suède) Pour les produits en bouteille, la température de l'air de l'espace de tête est supposée également à celle du jus.

1.12.2.4. Quantification des paramètres du modèle

Les propriétés thermophysiques des aliments (Tableau 9) ont été estimée à partir de la composition des aliments (cf. Tableau 9) et des modèles généraux proposés par (Choi & Okos, 1986) :

$$\rho = 1/\sum(M_f/\rho_f) \text{ (eq. A. 22)}$$

$$c_p = \sum(c_{p_f}M_f) \text{ (eq. A. 23)}$$

$$k = \sum(kV_f) \text{ (eq. A. 24)}$$

Avec M_f and V_f les fractions massiques et volumiques du $f^{\text{ème}}$ composant de l'aliment. Les propriétés thermophysiques de chaque composants sont issus des équations de (Phinney et al., 2017) à 25°C.

Tableau A. 24 : Composition de la purée de gombo (Inyang & Ike, 1998) et des autres produits (ANSES, n.d.)

	Unit	Okra puree	Mango Puree	Mango Nectar	Pineapple juice
Water content	g/100g (wet basis)	88,40%	83,00%	87,07%	86,30%
Simple Sugar content	g/100g (wet basis)	7,63%	14,84%	12,30%	12,10%
Protein content	g/100g (wet basis)	2,70%	1,14%	0,40%	0,70%
Fat content	g/100g (wet basis)	0,28%	0,60%	0,10%	0,50%
Ash content	g/100g (wet basis)	0,99%	0,42%	0,13%	0,40%
Specific heat (Cp)	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	3,70	3,65	3,61	3,48
Density (ρ)	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1042	1052	1053	1067
thermal conductivity (k)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,58	0,58	0,57*	0,56*

Dans l'espace de tête des bouteilles, les propriétés thermiques de l'air qui ont été utilisées sont :

- $C_{p_{\text{air}}} = 1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;
- $\rho_{\text{air}} = 1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- $k_{\text{air}} = 0.023 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Le coefficient de transfert de chaleur global h est calculé en considérant que la résistance globale $1/h$ est égale à la somme de trois résistance en série soit :

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_{\text{ext}}} + \frac{e_{\text{pack}}}{\lambda_{\text{pack}}} + \frac{1}{h_{\text{int}}} \text{ (eq. A. 25)}$$

Avec :

- h_{ext} : coefficient de transfert de chaleur convectif (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) entre le milieu chauffant et la paroi externe de l'emballage dont la valeur diffère selon le type d'autoclave (cf. tableau A.25).
- λ_{pack} : la conductivité thermique de l'emballage (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
- e_{pack} l'épaisseur de l'emballage (en m).
- h_{int} : le coefficient de transfert convectif (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) entre la paroi interne de l'emballage et l'aliment.

Tableau A. 25 : Hypothèses utilisées pour estimer la valeur de h_{ext}

Thermal treatment step	Autoclave heating type	h_{ext} ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
Heating and temperature holding	Water Immersion	6000
	Water circulation or spraying	30000
	Vapour	60000
Cooling with circulating cold water		4000

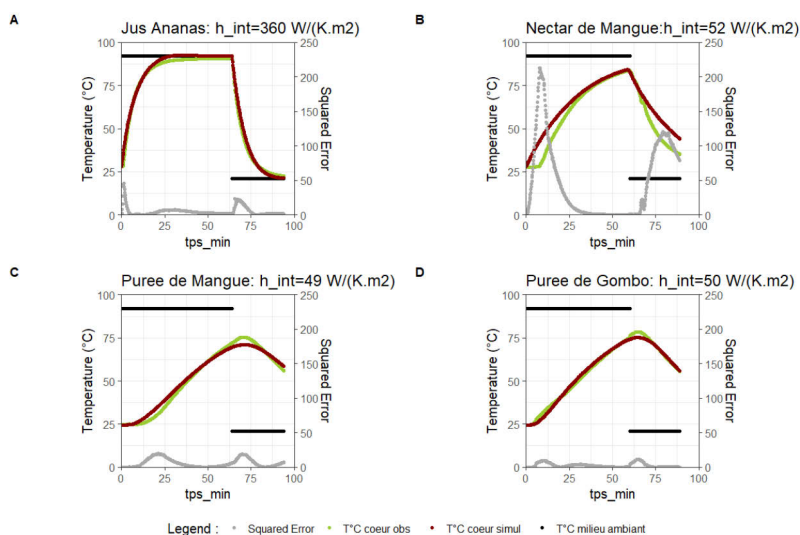
Tableau A. 26 : Données utilisées pour calculer le coefficient de transfert de chaleur dans l'emballage h_{pack} .

Packing type	Materials of the packaging layers		
	Type	Thickness (m)	Thermal conductivity ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Glass bottle	Glass	$3.0 \cdot 10^{-3}$	1.2
Stand up pouch	Aluminium (Al)	$9.0 \cdot 10^{-6}$	220
	Polypropylene (PP)	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.16
	Polyamide nylon (OPA)	$1.5 \cdot 10^{-5}$	0.25
	Polyethylene terephthalate (PET)	$1.2 \cdot 10^{-5}$	0.15

Tableau A. 27 : Valeurs de h_{int} qui ont été identifiées pour chaque couple (aliment ; type d'emballage)

Packaging	Food	Identified h_{int} ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	RMSE
1L twist off bottle	Pineapple juice	360	2.22
	Mango nectar	52	6.85
1kg stand up pouch	Mango puree	49	2.43
	Okra puree	50	

Les valeurs de h_{int} pour chaque couple (aliment ; type d'emballage) (tableau A.27) ont été identifiées en cherchant celles qui permettaient de minimiser le RMSE entre l'évolution de la température à cœur simulée et expérimentale. On peut observer une bonne adéquation entre les températures simulées et expérimentales (figure A.3).

Figure A. 3 : Comparaison entre les températures à cœur observées et simulées par le modèle pour la valeur de h_{int} retenue.

1.12.2.5. Modélisation de la qualité sanitaire

Par définition, la valeur stérilisatrice F_0 et la valeur pasteurisatrice P_0 au point froid ont été calculées de la façon suivante :

$$\frac{\partial P_0}{\partial t} = 10^{\frac{T_{coldpoint}^{(t)} - T_{refP_0}}{Z_{P_0}}} \quad (eq. A. 26)$$

$$\frac{\partial F_0}{\partial t} = 10^{\frac{T_{coldpoint}^{(t)} - T_{refF_0}}{Z_{F_0}}} \quad (eq. A. 27)$$

Avec :

- $T_{coldpoint}^{(t)}$: la température au temps t, lorsqu'elle est supérieure à 60 °C pour le calcul de P_0 et supérieure à 100 °C pour le calcul de F_0 (températures minimales réputées létales pour les formes végétatives et les spores thermorésistantes)
- T_{refP_0} : la température de référence pour le calcul de la valeur pasteurisatrice (70 °C)
- $Z_{P_0} = 10$ °C
- T_{refF_0} : la température de référence pour le calcul de la valeur stérilisatrice (121,1 °C)
- $Z_{F_0} = 10$ °C

1.13. Modélisation du nettoyage

L'hypothèse a été faite qu'à la fin d'une rotation de 8 h, chaque équipe devrait nettoyer le matériel utilisé pendant un temps imparti à chacune d'elles (cf. tableau A.23). Pour estimer le temps de nettoyage de chaque équipe, le nombre d'opérateur minimal par équipe était retenu (3 opérateurs pour l'équipe 1 ; 2 opérateur pour l'équipe 2) et il a été considéré que :

- Le nettoyage de chaque équipement nécessitait un opérateur pendant 10 min.
- Le nettoyage de l'espace de tri-lavage nécessitait un opérateur pendant 30 min.
- Le nettoyage de l'ensemble de l'enceinte du container nécessitait un opérateur pendant 40 min.

Chaque phase de nettoyage, la quantité d'eau nécessaire pour nettoyer les équipements a été définie. L'hypothèse simplificatrice est que la quantité d'eau consommée pour chacune de ces phases ne dépend pas des variables de conception (nombre d'opérateurs / équipe, nombre d'équipements, modèles d'équipements). Pour estimer les quantités d'eau nécessaires pour le lavage, les hypothèses suivantes ont été prises en compte :

- 20 L d'eau de lavage étaient nécessaires par équipement
- 50 L pour laver l'espace de la salle de lavage et de tri-parage des matières premières
- 160 L pour nettoyer les surfaces au sol et les parois de l'enceinte (soit environ 6 L/m²)

Tableau A. 28 : Tâches et temps de lavage par équipe

N° d'équipe	Equipe	Elements à nettoyer	Durée du nettoyage par équipe	Consommation en eau
1	Preparation team	Nettoyage de (i) la zone hors du container affectée au lavage, au tri et au parage (ii) des cuves de lavages (3 cuves max) et (iii) des tables de tri-parage (2 tables max)	30 min	150 L ^(a)
2	Extraction team	Nettoyage (i) des équipements d'extraction pour chaque configuration (4 blancheurs et 1 cutter pour la configuration purée de gombo ; 1 broyeur et 1 presse pour la configuration jus d'ananas ; 1 raffineuse pour la configuration purée et nectar de mangue), (ii) des cuves d'homogénéisation (3 max) et (iii) de la pompe de transfert	45 min pour nettoyer les 9 équipements qui peuvent être gérés au maximum par cette équipe	180 L ^(b)
3	Packaging team	Nettoyage de (i) la doseuse et de sa trémie et (ii) de la machine de scellage	30 min	60 L ^(c)
4	Autoclave team	Nettoyage (i) des 2 autoclaves (au max) et (ii) du sol et des parois de tout le container	60 min	200 L ^(d)
(a): Les hypothèses suivantes ont été retenues : <ul style="list-style-type: none"> - 60 L pour le lavage des cuves (à raison de 20L d'eau de lavage / cuve) - 40 L pour le lavage des tables de tri-parage au maximum (à raison de 20L d'eau de lavage / cuve) - 50 L pour le lavage de la salle d'ambiance 				
(b) : Les hypothèses suivantes ont été retenues : <ul style="list-style-type: none"> - 100L au maximum pour nettoyer les équipements d'extraction - 80L au maximum pour nettoyer les 3 cuves d'homogénéisation et la pompe de transfert 				
(c) : En considérant qu'il fallait 20 L pour nettoyer la trémie, 20 L pour nettoyer le piston et 20 L pour nettoyer la machine de scellage				
(d) : En considérant qu'il fallait 20 L par autoclave (soit 40 L max) et 160 L pour nettoyer les surfaces au sol et les parois de l'enceinte (soit environ 6 L/m ²)				

2. Modèles utilisés au niveau du procédé

2.1. Description du simulateur d'évènements discrets

Pour implémenter le simulateur d'évènement discret du procédé, la librairie SimPy (Lünsdorf & Scherfke, 2020) a été utilisée. Cette librairie permet de réaliser des simulations par DES avec le langage de programmation Python (version 3.7.4). La documentation est accessible en ligne (<https://simpy.readthedocs.io/>).

La simulation d'évènements discrets consiste à représenter le cheminement de lots de produits au sein d'une ligne de production comme une succession d'évènements. La figure A.4 fournit un exemple de la façon avec lesquels différents évènements étaient simulés par le DES développé dans cette étude.

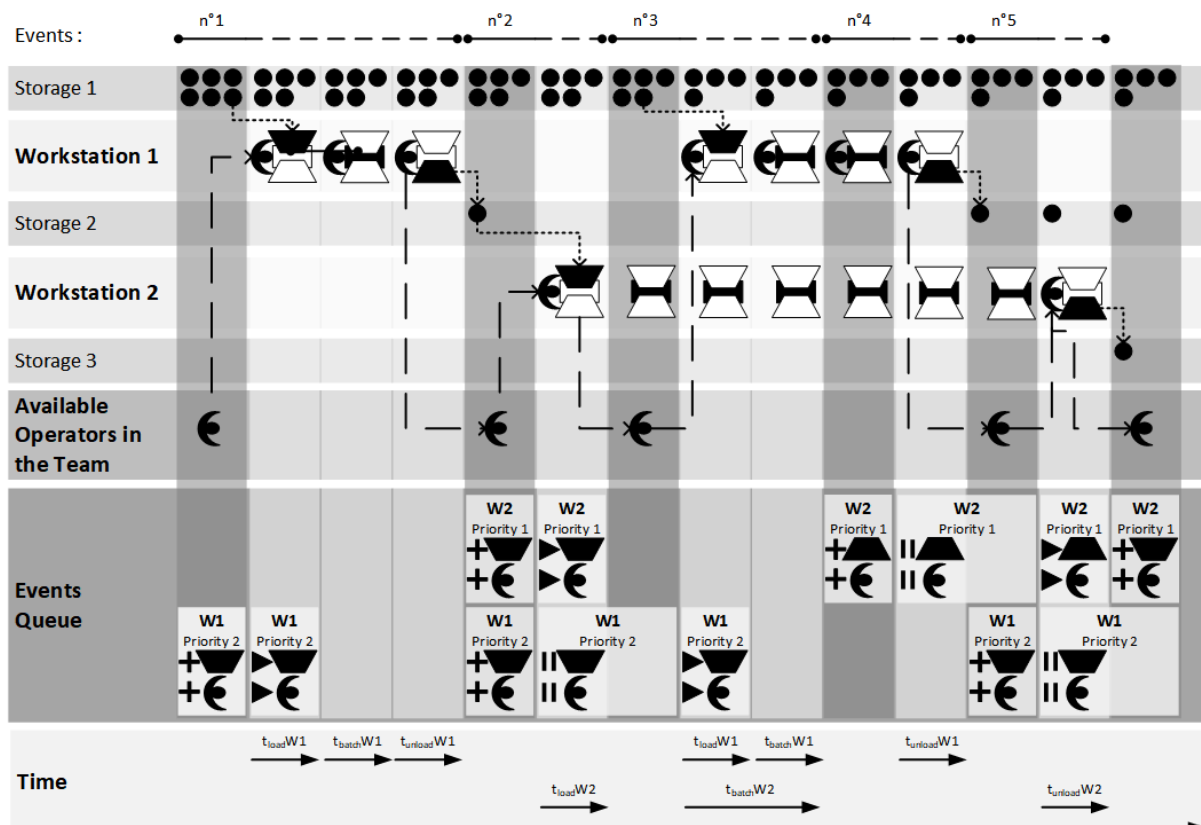


Figure A. 4 : Schéma du fonctionnement du DES. Lorsque les conditions sont réunies, les évènements sont générés et s'ajoutent dans la queue (le symbole + indique qu'un évènement est créé ; le symbole || indique que l'évènement est en attente de déclenchement ; le triangle symbolise le déclenchement de l'évènement). Si un opérateur et de la matière première sont disponibles, l'évènement est déclenché. Lorsque l'opération unitaire est terminée, l'opérateur redevient disponible et le produit est transféré dans la zone de stockage suivante.

Un **évènement** représente un changement d'état du système qui se produit à un instant donné. Un évènement est caractérisé par sa date d'occurrence, l'équipement qu'il concerne ainsi que son/ses action(s) sur le système. Dans cette étude, le chargement et le déchargement d'un équipement étaient les deux évènements qui étaient pris en compte. Deux d'actions de transferts de matière (chargement et déchargement de matière dans un équipement) leur étaient associées pour représenter le cheminement des lots de produits d'une opération unitaire à l'autre. Deux autres actions (mobilisation ou libération d'un opérateur) leur étaient associées pour représenter la mise en œuvre des opérations unitaires par les opérateurs. Les évènements étaient générés par des **postes de travail** lorsque certaines conditions étaient remplies (*cf. infra*). Comme illustré sur la figure A.4, chaque

évènement généré était ajouté à la queue des évènements gérée par le DES. Un évènement généré pouvait successivement être « en attente » (not triggered), « en cours d'exécution » (triggered) puis « résolu » (processed).

Pour chaque équipement contenu dans la solution de conception simulée, un **poste de travail** était créé. Un poste de travail représentait l'équipement dans lequel une opération unitaire pouvait être exécutée. Si la solution de conception contenait plusieurs équipements identiques, plusieurs postes de travail pouvaient donc être créés pour une même opération unitaire. Les caractéristiques d'un poste de travail étaient définies à partir des caractéristiques des équipements calculées au niveau de l'opération unitaires :

- Capacité de l'équipement (m_{in}),
- Temps d'exécution d'une opération unitaire (t_{batch}), temps de chargement (t_{load}) et de déchargement (t_{unload}) de l'équipement,
- Besoin ou non d'un opérateur pendant l'exécution de l'opération unitaire,
- Utilités consommées pendant le fonctionnement de l'équipement.

Une **zone de stockage** était créée avant chaque opération unitaire, pour représenter le fait qu'entre deux équipements, la matière pouvait y être stockée temporairement. Les zones de stockage représentent un stock de matières dans lequel les postes de travail peuvent prélever ou ajouter de la matière. Lors de l'exécution d'une action de chargement, une quantité de matière m_{in} était prélevée dans la zone de stockage de l'opération unitaire. Lors de l'exécution d'une action de déchargement, une quantité de matière m_{out} était ajoutée dans la zone de stockage de l'opération unitaire suivante. Une fois que pour un lot de produit, la dernière opération de la recette était terminée, il était placé dans une zone de stockage à l'extérieur du container. A noter que pour une opération unitaire, il pouvait y avoir plusieurs postes de travail mais une seule zone de stockage où prélever m_{in} et une seule zone de stockage où ajouter m_{out} . m_{out} était calculé à partir de la capacité de l'équipement (m_{in}) et du rendement massique de l'opération unitaire présentés dans le tableau A.1.

Lorsque la quantité de matière dans le stock d'une opération unitaire était supérieure à un certain seuil (cf. seuils de déclenchements présentés dans le tableau A.29), un évènement « chargement du poste de travail » était généré. Lorsque le temps d'exécution t_{batch} de l'opération unitaire était écoulé, un évènement de déchargement était généré.

Pour être déclenché, l'évènement généré par un poste de travail nécessitait qu'un opérateur de l'équipe dont il dépendait soit disponible. L'exécution d'une action de chargement ou de déchargement par un poste de travail entraînait la mobilisation d'un opérateur :

- Pour les opérations unitaires qui nécessitaient un opérateur pendant le fonctionnement de l'opération unitaire (voir le cas de la « workstation 1 » sur la figure A.1), le déclenchement d'une opération de chargement entraînait l'immobilisation d'un opérateur pendant $t_{load} + t_{batch} + t_{unload}$.
- Pour les opérations unitaires qui nécessitaient un opérateur pendant le fonctionnement de l'opération unitaire (voir le cas de la « workstation 2 » sur la figure A.1), une fois le chargement terminé, l'opérateur était libéré. Une fois cette opération unitaire terminée (à la fin de t_{batch}), le poste de travail nécessitait qu'un opérateur soit disponible pour que le déchargement soit déclenché. Une fois déclenché, le chargement mobilisait un opérateur pendant t_{unload} .

Tableau A. 29 : Priorités affectées aux opérations unitaires affectées aux 4 équipes de travail et conditions de déclenchement des événements « chargement du poste de travail »

Team n°	Number of operators in the team	Product	Unit Operation	Unit operation priority	Trigger threshold
1	3 - 6	All	Washing	n°3	0 ⁽¹⁾
		All	Sorting-Triming	n°2	Quantity in the storage area ≥ equipment capacity
		All	Transfer into the container	n°1	0 ⁽²⁾
2	2 - 5	Okra Puree	Blanching	n°6	Quantity in the storage area ≥ equipment capacity
			Transfer to the cutter	n°5	
			Cutting	n°4	
		Mango Puree and Nectar	Pulping	n°4	
		Pineapple Juice	Grinding	n°6	
			Transfer to the press	n°5	
			Pressing	n°4	
		All	Transfer to the homogenisation vat	n°3	
All	Homogenisation	n°2	Quantity in the storage area ≥ homogeniser capacity ⁽³⁾		
3	1	All	Loading the hopper of the filling machine	n°1	Quantity in the hopper of the filling machine ≤ 3 kg
		All	Filling	n°2	Quantity in the storage area ≥ equipment capacity
		Okra and Mango Puree	Sealing	n°1	
		Pineapple Juice and Mango Nectar	Capping	n°1	
4	1	All	Autoclave	n°1	

⁽¹⁾: As long as there is raw material to be washed, washing must be carried out.
⁽²⁾: As soon as the product is trimmed, it must be transferred inside the container for the extraction steps.
⁽³⁾: The capacity takes into account the water that can be added during homogenisation.

Si tous les opérateurs d'une équipe étaient mobilisés, tous les événements générés par les postes de travail dont dépendaient cette équipe étaient placés en attente jusqu'à ce qu'un opérateur de l'équipe soit libéré. Comme détaillé dans le tableau A. 29, le nombre d'opérateurs qui pouvaient être mobilisés par les différents postes de travail était limité et variait selon les équipes de travail et les solutions de conception.

Les zones de stockage et les équipes d'opérateurs étaient des ressources partagées par plusieurs postes de travail. Pour chacune d'elles, le simulateur gérait **deux files d'attente** : une file d'attente des événements qui augmentaient la capacité de la ressource (déchargement d'un équipement dans une zone de stockage ou libération d'un opérateur d'une équipe) et une file d'attente des événements qui diminuaient la capacité de la ressource (prélèvement de matière dans une zone de stockage pour charger un équipement ou mobilisation d'un opérateur). L'une des fonctions du simulateur était de déclencher les événements par ordre d'arrivée des événements dans les files d'attentes (First In First Out) et par ordre de **priorité**. Pour chaque équipe, les opérations prioritaires étaient celles situées le plus en aval de la recette afin d'éviter que les lots ne stagnent dans l'atelier (cf. tableau A. 29). Par exemple, si deux postes de travail nécessitaient la mobilisation de l'opérateur d'une même

équipe, le simulateur allouait l'opérateur disponible à l'évènement généré par l'opération unitaire prioritaire et l'évènement correspondant était déclenché.

Dans le DES, chaque poste de travail représentait un processus (au sens informatique du terme), et tous les processus étaient exécutés en parallèle. Chaque minute, la tâche du DES était de traiter les évènements générés par les postes de travail les uns après les autres afin qu'ils soient déclenchés, mis en pause (c'est-à-dire reporté à une date ultérieure) et/ou résolus. Pour cela, le DES tenait compte des contraintes de disponibilité des ressources (matière et opérateurs) et de priorisation des évènements décrites précédemment. Lorsqu'un évènement était déclenché, l'autre fonction du DES était d'implémenter les actions associées.

Pour déterminer l'horizon de temps pendant lequel le DES devait simuler le fonctionnement de l'atelier, nous avons considéré que l'équipe de préparation commencerait sa journée de travail à 6h30 et que le nettoyage complet de la ligne était effectué quotidiennement par l'équipe n°4 à partir de 18h pendant 1 h. L'horizon de temps de la simulation était donc de 12h30 par jour. La simulation prenait fin lorsque l'horizon de temps était écoulé. Pendant la simulation, le DES décomptait le temps de travail de chaque équipe afin de prendre en compte que le temps de travail par équipe était de 8 h par jour et que chacune avait le droit à 1 h de pause par jour. Pour chaque équipe, ces 8 h de travail contenaient un temps dédié au nettoyage des équipements (*cf.* partie 1.13). Lorsque le temps de travail journalier d'une équipe était écoulé, ses opérateurs n'étaient plus disponibles pour réaliser des opérations unitaires et les évènements générés par les postes de travail associés ne pouvaient donc plus être déclenchés et exécutés. Ainsi, bien que l'horizon de temps de la simulation ait été de 12h30, comme les équipes commençaient et terminaient leur journée de travail de façon décalée, jusqu'à 3 rotations de 8h par équipe étaient possibles par jour.

2.2. Organisation des simulations

Deux simulations étaient effectuées pour chaque produit. Le but de la première simulation était de déterminer quelle était la capacité de production ($Q_{prod/8h}^p$) de la solution par produit p par rotation (en kg/rotation).

Dans la seconde simulation, l'objectif était de déterminer la chronologie des opérations unitaires correspondante à une organisation de production par lot. La quantité de produit fini dans un lot correspondait à la capacité de l'autoclave de la solution. Cette valeur était utilisée pour calculer la quantité de matière première nécessaire pour produire un lot de produit fini en tenant compte du rendement d'extraction global de la recette du produit (*cf.* tableau A. 29).

Dans la seconde simulation, l'opération de lavage d'un lot de matière première par l'équipe n°1 était déclenchée en tenant compte de la différence entre (i) le temps nécessaire pour préparer, extraire et conditionner un lot et (ii) le temps nécessaire pour stabiliser un lot. Le but était de déclencher la préparation d'un lot de manière à ce qu'il soit entièrement conditionné (c'est-à-dire prêt à être traité thermiquement) dès que le traitement thermique du lot précédent est terminé. Cette gestion de production "juste à temps" avait pour but de minimiser le temps pendant lequel la matière première parée était exposée à l'air ambiant (et donc à la contamination) avant d'être stabilisé thermiquement. Dans cette organisation de production, les équipes d'opérateurs pouvaient ne pas travailler de façon continue. Les pauses des 4 équipes étaient positionnées en milieu de journée de façon à correspondre le plus possible avec les moments pendant lesquels elles n'auraient pas de matière à transformer.

Il est à noter que dans la réalité, les pannes, ralentissements de cadence et la production de produits défectueux affectent la production mais sont complexes à prendre en compte dans un travail de conception.

2.3. Calcul des indicateurs de performance au niveau du procédé

Pour chaque produit fini, les résultats de la seconde simulation étaient utilisés pour estimer les indicateurs intermédiaires suivants :

- $t_{trim}(l_1^p)$: la date de déclenchement (en min) de l'opération de parage pour le premier lot (quantité de produit contenue dans l'autoclave de la solution) de la rotation,
- $t_{stab}(l_1^p)$: la date de déclenchement (en min) de l'opération de stabilisation thermique pour le premier lot de la rotation,
- $QWIP_j^p(t)$: la quantité (kg) de matière en transfert dans chaque zone j séparant les opérations unitaires effectuées dans le container, à chaque instant t .
- $t_{work/8h}(e_i^p)$: le temps total (min) de fonctionnement de chaque équipement e_i^p ,
- $n_{batch/8h}(e_i^p)$: le nombre de batchs de chaque équipement e_i^p .

Les valeurs de $t_{trim}(l_1^p)$, $t_{stab}(l_1^p)$ et $QWIP_j^p(t)$ étaient utilisées pour calculer les indicateurs de performance t_{prep}^p (temps pour préparer un lot de produit) et Q_{maxWIP}^p (quantité maximale de produit en transfert par rotation).

Ces indicateurs intermédiaires permettaient également d'estimer les indicateurs de performance associés aux objectifs « Opérabilité dans les zones enclavées » et « Utilisation efficiente des utilités » (cf. tableau 19 du Chapitre 6) de la façon suivante :

$$P_{elec}^p = \sum_i (p(e_i^p) \times N(e_i^p)) \quad (eq. A. 28)$$

$$Q_{gas/8h}^p = \sum_i (q_{gas}(e_i^p) \times t_{work/8h}(e_i^p)) \quad (eq. A. 29)$$

$$V_{water/8h}^p = \sum_i (v_{water}(e_i^p) \times n_{batch/8h}(e_i^p)) \quad (eq. A. 30)$$

$$\eta_{elec}^p = \frac{\sum (p_{elec}(e_i^p) \times t_{work/8h}(e_i^p))}{Q_{prod/8h}^p} \quad (eq. A. 31)$$

$$\eta_{gas}^p = \frac{Q_{gas/8h}^p}{Q_{prod/8h}^p} \quad (eq. A. 32)$$

$$\eta_{water}^p = \frac{Q_{water/8h}^p}{Q_{prod/8h}^p} \quad (eq. A. 33)$$

Avec :

- $p(e_i^p)$: la puissance active (en kW) de chaque équipement e_i^p ,
- $N(e_i^p)$: le nombre de chaque équipement e_i^p ,
- $q_{gas}(e_i^p)$: la consommation horaire en gaz q_{gas} (en kg/h) de chaque équipement e_i^p ,
- $v_{water}(e_i^p)$: la consommation en eau par batch (en L/batch) de l'équipement e_i^p .

3. Modèle utilisés au niveau de l'atelier

3.1. Calcul des indicateurs de performance au niveau de l'atelier

Les 3 indicateurs de performance économiques ont été calculés au niveau de l'atelier. Cette partie détaille les hypothèses et les formules utilisées pour calculer :

- i. Les charges d'exploitation mensuelles (MOC^p)
- ii. Le résultat d'exploitation mensuel (MOP^p)
- iii. le retour sur investissement (ROI^p)

Le calcul des charges d'exploitation mensuelles (MOC^p) prenait en compte tous les coûts (€/mois) engendrés par l'utilisation de la MPU pour produire le produit p à l'exception des coûts liés (i) aux systèmes permettant de produire, stocker et/ou traiter les utilités (générateur, cuve de stockage d'eau, système de traitement de l'eau), (ii) aux infrastructures de l'utilisateur (bâtiments nécessaires pour stocker les matières premières et les produits finis notamment), et (iii) aux impôts. Cet indicateur de performance était calculé de la façon suivante :

$$MOC^p = MC_{MPU}^p + MC_{rm}^p + MC_{pack}^p + MC_{util}^p + MC_{lab}^p \quad (eq. A. 34)$$

Avec:

- MC_{MPU}^p : le coût de location mensuel de la MPU (cf partie XXX ci-après),
- MC_{rm}^p : le coût mensuel des matières premières (cf partie XXX ci-après),
- MC_{pack}^p : le coût mensuel des emballages (cf partie XXX ci-après),
- MC_{util}^p : le coût mensuel des utilités (cf partie XXX ci-après),
- MC_{lab}^p : le coût mensuel du travail (cf partie XXX ci-après).

Le calcul du résultat d'exploitation mensuel (MOP^p) était à partir du chiffre d'affaire mensuel (MOR^p) généré par la production et la vente du produit p de la façon suivante :

$$MOP^p = MOR^p - MOC^p \quad (eq. A. 35)$$

Enfin, en considérant que le coût d'exploitation mensuel représente l'investissement mensuel de l'utilisateur de la MPU et que le résultat d'exploitation mensuel est le montant que cet investissement permet de gagner, le retour sur investissement (ROI^p) était calculé comme suit :

$$ROI^p = MOP^p / MOC^p \quad (eq. A. 36)$$

3.2. Hypothèses générales pour les calculs à l'échelle de l'atelier

Tous les calculs économiques ont été effectués en €. Pour cela, les valeurs exprimées en FCFA étaient converties en € en utilisant un taux de change de 656 FCFA/€.

Toutes les variables économiques étaient calculées à l'échelle du mois d'utilisation en considérant que chaque rotation durait 8h, qu'il y aurait 2 rotations / jour de production et 22 jours de production par mois (soit 5 jours / semaine).

Pour l'ensemble des flux financiers comptabilisés au niveau de l'atelier, les échéances de paiements étaient mensuelles et les délais de paiement étaient considérés comme nuls.

3.3. Calculs du coût de location mensuel de la MPU

3.3.1. Coût des équipements composant la MPU

La première étape du calcul consistait à calculer le coût DDP (Delivered Duty Paid) chez l'assembleur à Abidjan de l'ensemble des équipements composant la MPU. L'hypothèse a été

faite que les petits équipements (bassines de transfert et les tables par exemple) et les accessoires seraient achetés en Côte d'Ivoire. Ils n'étaient donc pas inclus dans ce calcul. Les valeurs des paramètres qui ont été utilisés dans les équations sont synthétisées dans le tableau A.30.

Tableau A. 30 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le coût DDP (Delivered Duty Paid) des équipements d'une solution

Paramètre	Valeur	Unité	Description
$C_{EXW \rightarrow FRA}$	150	€/équipement	Coût moyen du transport routier, par équipement, entre l'usine européenne du fabricant et le lieu d'expédition en France
$\tau_{Ins/CFR}$	0.4	% of CFR value	Taux d'assurance du fret calculé à partir de la valeur CFR (Cost & Freight) de la marchandise
$C_{FRA \rightarrow Abj}^{Freight}$	2200	€	Coût du transport maritime entre le lieu d'expédition en France et Abidjan
$\tau_{cust/CIF}$	5%	% of CIF value	Taux de douane applicable sur les machines et appareils pour la préparation de fruits et légumes (en % de la valeur CIF)
$\tau_{TVA/CIF}$	2%	% of CIF value	Taux de TVA applicable sur les produits entrant dans l'espace UEMOA (en % de la valeur CIF)
$C_{port/abj}$	1200	€	Coût des opérations portuaires à Abidjan
C_{forw}	1170	€	Coût du transitaire
C_{del}	250	€	Coût de la livraison chez l'assembleur (transport depuis le port)

A partir du prix Ex works (p_{EXW}) de chaque équipement i , le prix EXW des n_i équipements contenus dans la solution de conception était calculé comme suit :

$$C_{EXW} = \sum n_i \times p_{EXW}^i \quad (eq. A. 37)$$

Le coût de transport intra-européen C_{FRA_EXW} des n_{eq} équipements contenus dans une solution de conception (depuis les fabricants jusqu'au lieu d'expédition), a été calculé comme suit:

$$C_{FRA_EXW}^S = n_{eq} \times C_{EXW \rightarrow FRA} \quad (eq. A. 38)$$

Puis, la valeur CIF (Cost Insurance & Freight) des équipements de la solution de conception était calculée comme suit :

$$C_{CIFAbj} = (1 + \tau_{Ins/CFR}) \times (C_{EXW} + C_{FRA_EXW} + C_{FRA \rightarrow Abj}^{Freight}) \quad (eq. A. 39)$$

Pour déterminer le montant des taxes à payer à l'importation, l'hypothèse a été faite que tous les équipements bénéficieraient du taux de douane applicable sur les équipements de transformation de fruits et légumes et que du fait de l'assemblage de la MPU en Côte d'Ivoire, les équipements seraient exonérés de TVA en Côte d'Ivoire. Seul une TVA de 2% serait applicable au titre de l'entrée de produits dans l'espace de l'Union Economique et Monétaire Ouest-Africaine. Le montant des taxes à payer était calculé sur la valeur CIF des équipements comme suit :

$$C_{taxes} = (r_{cust/CIF} + r_{TVA/CIF}) \times C_{CIFAbj} \quad (eq. A. 40)$$

Enfin, la valeur DDP (Delivery Duty Paid) des équipements livrés chez l'assembleur à Abidjan était calculée comme suit :

$$C_{DDP}^S = C_{CIFAbj}^S + C_{taxes}^S + c_{portAbj} + c_{forw} + c_{del} \quad (eq. A. 41)$$

3.3.2. Faisabilité et identification des modèles de container, de semi-remorque et de système de levage adaptés

Les caractéristiques de l'ensemble des équipements d'une solution de conception permettaient d'identifier quel était le modèle de container aménagé (cf tableau A.31), le modèle de semi-remorques (cf tableau A.32) et le modèle de système de levage (cf tableau A.33) qui était le plus adapté. Pour cela, pour chaque configuration produit (cf figure 26 du Chapitre 6), les valeurs suivantes étaient calculées :

- La hauteur de l'équipement le plus grand,
- Le poids total des équipements,
- La longueur totale (largeur cumulée des équipements de la configuration en tenant compte de l'espace nécessaire entre chacun d'eux pour réaliser les opérations de transfert de produits intermédiaires)

Le container adapté (20 pieds ou 40 pieds standard ou high cube) était celui qui pouvait contenir la configuration la plus longue et l'équipement le plus haut. Si aucun container n'était possible, la solution était considérée comme infaisable. Une fois le choix du container choisi, le semi-remorque correspondant (20 ou 40 pieds) était choisi. Enfin, le système de levage était choisi de façon à pouvoir soulever 130% du poids de l'enveloppe et de la configuration la plus lourde (solution infaisable si le poids total > capacités possible des systèmes de levage).

Tableau A. 31 : Caractéristiques des modèles de containers aménagés possibles.

Model ID	Container Type	Empty weight (kg)	Inner length (mm)	Inner width (mm)	Inner height (mm)	DDP Cost (€)
1	20 feet	2 200	5 810	2 270	2 310	16 700
2	20 feet High Cube	2 500	5 810	2 270	2 600	16 700
3	40 feet	3 800	11 950	2 270	2 310	22 930
4	40 feet High Cube	4 100	11 950	2 270	2 600	22 930

Tableau A. 32 : Caractéristiques des modèles de semi-remorques possibles

Model ID	Semi-trailer length (feet)	DDP Cost (€)
1	20	7 600
2	40	10 640

Tableau A. 33 : Caractéristiques des modèles de systèmes de levage (« lifting system ») possibles

Model ID	Lifting capacity (kg)	DDP Cost (€)
1	10 000	14 850
2	20 000	19 860

Comme le semi-remorque et le système de levage avaient une durée de vie égale à celle de la MPU, en considérant qu'ils pouvaient être utilisés par l'exploitant pour livrer plusieurs MPUs aux utilisateurs, leur coût a été partagé entre 5 MPU. Le coût du container et du système de levage par MPU était calculé comme suit :

$$C_{\text{MobilitySystems}/\text{MPU}} = \frac{c_{\text{semi-trait}} + c_{\text{liftingsyst}}}{5} \quad (\text{eq. A. 42})$$

3.3.3. Calcul du prix de location

3.3.3.1. Calcul du prix de revient

Pour calculer le coût de revient CP (Cost Price) de la solution pour le fabricant, le coût d'assemblage et celui de la livraison de la MPU chez l'utilisateur (cf tableau A.34) ont été ajoutés aux coûts du container, du semi-remorque et du système de levage comme suit :

$$CP = C_{\text{DDP}} + c_{\text{containerDDP}} + C_{\text{MobilitySystems}/\text{MPU}} + c_{\text{potence}} + c_{\text{assembling}} + c_{\text{delivery}} \quad (\text{eq. A. 43})$$

Tableau A. 34 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le coût de revient la MPU pour le fabricant

Paramètre	Valeur	Unité	Description
c_{potence}	5000	€	Cout d'une potence pour le chargement/déchargement des paniers dans l'autoclave
$c_{\text{assembling}}$	4000	€	Cout d'assemblage des équipements dans le container / MPU
c_{delivery}	712	€	Cout pour tracter l'UM entre Abidjan et Toumoudi

3.3.3.2. Prix de vente de la MPU

Nous avons considéré que la MPU et ses accessoires seraient vendus à une entreprise exploitante située dans le centre de la Côte d'Ivoire. Sur 10 ans, le prix de vente (SP , selling price) d'une solution et de ses accessoires était calculé en tenant compte de différentes hypothèses (cf tableau A.35 ci-dessous) comme suit :

$$SP_{\text{MPU}+\text{access}10\text{y}} = SP_{\text{MPU}} + SP_{\text{access}10\text{y}} \quad (\text{eq. A. 44})$$

Avec :

$$SP_{\text{MPU}} = CP_{\text{MPU}} \times (1 + r_{\text{markupMPU}}) \quad (\text{eq. A. 45})$$

$$SP_{\text{access}10\text{y}} = \frac{l_{\text{MPU}}}{l_{\text{Access}}} \times CP_{\text{access}} \times (1 + r_{\text{markupAccess}}) \quad (\text{eq. A. 46})$$

Tableau A. 35 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de vente de la MPU et de ses accessoires

Paramètre	Valeur	Unité	Description
$r_{\text{markupMPU}}$	25%	% du coût de revient	Taux de markup du fabricant calculé sur le coût de revient
$r_{\text{markupAccess}}$	15%	% du coût de revient	Taux de markup du fabricant calculé sur le coût de revient des accessoires de la MPU (petit équipement, tables, bassines etc)
l_{MPU}	10	années	Durée de vie réelle de la MPU en exploitation
l_{Access}	4	années	Durée de vie réelle des accessoires en exploitation

Les équipements qui étaient considérés comme des accessoires devant être acheté par chaque utilisateur étaient les tables de tri-parage ainsi que les cuves de transfert et de lavage.

3.3.3.3. Prix annuel de location EXW Toumoudi

Le coût annuel de location de la MPU par son exploitant ($AC_{\text{MPU}/y}$) prend en compte le coût annuel de la MPU pendant sa durée de vie réelle, le coût de maintenance annuel ($c_{\text{maint}/y}$), le montant des intérêts payés annuellement pour rembourser le capital emprunté pour financer l'achat de la MPU (i_{annual}) et le taux de marge de l'exploitant ($r_{\text{RentalMarkup}}$). Le tableau A.36 donne les valeurs des hypothèses utilisées dans ce calcul :

$$AC_{\text{MPU}/y} = \left(\frac{SP_{\text{MPU}+\text{access}10y}}{l_{\text{MPU}}} + c_{\text{maint}/y} + i_{\text{annual}} \right) \times (1 + r_{\text{RentalMarkup}}) \quad (\text{eq. A. 47})$$

Pour calculer le montant annuel des intérêts (i_{annual}), nous avons considéré que la totalité du prix d'achat de la MPU était emprunté pendant la durée de vie de la MPU. Les équations suivantes ont été utilisées (avec A l'annuité de l'emprunt):

$$A = \frac{SP_{\text{MPU}+\text{access}10y} \times r_{\text{loan}/y}}{1 - (1 + r_{\text{loan}/y})^{-l_{\text{MPU}}}} \quad (\text{eq. A. 48})$$

$$i_{\text{annual}} = \frac{(A \times l_{\text{MPU}}) - SP_{\text{MPU}+\text{access}10y}}{l_{\text{MPU}}} \quad (\text{eq. A. 49})$$

Tableau A. 36 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de location annuel de la MPU

Paramètre	Valeur	Unité	Description
$c_{\text{maint}/y}$	5000	€	Coût de la maintenance annuelle
$r_{\text{loan}/y}$	5	%	Taux d'intérêt annuel de l'emprunt
$r_{\text{RentalMarkup}}$	5	%	Taux de markup de l'exploitant de la MPU calculé sur son coût de revient

3.3.3.4. Prix mensuel de location livré utilisateur

Pour calculer le prix mensuel de location de la MPU pour le produit p (C_{MPU}^p), le coût de transport la MPU jusqu'au site de chaque utilisateur (C_{transp}^p) a été pris en compte. en utilisant les différentes hypothèses effectuées sur la localisation de chaque utilisateur et sur la durée d'utilisation par chacun d'eux (cf tableau A.37) de la façon suivante :

$$C_{MPU}^p = \frac{AC_{MPU}/y}{8} + \frac{c_{transp}^p}{n_{prod}^p} \quad (eq. A. 50)$$

Tableau A. 37 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de location mensuel de la MPU

Zone de l'utilisateur	Produit fini p	Nombre de mois de production / an (n_{prod}^p)	Coût du transport de la MPU / produit p (c_{transp}^p)
Nord Côte d'Ivoire	Mango Puree	2	1285 €
	Mango Nectar	2	1285 €
Centre Côte d'Ivoire	Okra Puree	2	665 €
	Pineapple Juice	2	665 €

3.4. Coût mensuel en matières premières

3.4.1. Quantité de matière première nécessaire par mois

Pour chaque produit fini, la quantité de matière première nécessaire par mois d'utilisation était calculée en tenant compte (i) de la capacité de production de la solution ($Q_{prod/8h}^p$) estimée par le DES, (ii) des rendements d'extractions globaux de chaque produit fini (cf tableau A.1) et (iii) du nombre de rotations par mois d'utilisation ($n_{8hshift/month} = 44$ rotations de 8h / mois).

Parmi les 4 produits finis, le nectar de mangue était le seul dans lequel d'autres ingrédients étaient ajoutés à l'étape d'homogénéisation (eau, sucre et jus de citron) dans les proportions indiquées dans le tableau A.38 ci-dessous. Ces proportions permettaient de calculer les quantité mensuelle consommée en sucre, en citron et en eau à partir de la quantité Q_{8h}^{MN} de nectar de mangue produite par rotation de 8h.

Tableau A. 38 : Proportions d'ingrédients à ajouter dans la purée de mangue pour obtenir du nectar (en kg/kg de purée de mangue)

Ingrédient à ajouter	Quantité d'ingrédient ajoutée	Unité
Purée de mangue	100%	kg / kg de purée de mangue
Sucre	36%	kg / kg de purée de mangue
Jus de citron	28%	kg / kg de purée de mangue
Eau	236%	kg / kg de purée de mangue
Masse finale nectar obtenu Mn (kg)	400%	kg / kg de purée de mangue

3.4.2. Coût mensuel en matières premières

Pour chaque produit, le coût mensuel en matières premières (MC_{rm}^p) a été calculé à partir de la capacité de production de la solution ($Q_{prod/sh}^p$) estimée par le DES et du prix des matières premières (cf tableau A.39 ci-dessous). Pour estimer le prix d'achat de chaque matière livrée à l'utilisateur, les frais de collecte d'entreprises locales, ainsi que les prix moyens des matières premières pendant les périodes de récolte ont été relevés. Pour le jus citron, un rendement d'extraction moyen du jus a été utilisé pour estimer le coût du jus de citron à partir du prix du citron. Les livraisons étaient supposées journalières donc les coûts de stockages des matières premières étaient considérés comme nul.

Tableau A. 39 : Valeur des paramètres utilisés pour calculer le prix de location annuel de la MPU

Paramètre	Valeur	Unité	Description
P _{okra}	74	FCFA/kg	Prix moyen du gombo frais livré à la MPU de Septembre à Octobre
P _{pineapple}	70	FCFA/kg	Prix moyen de l'ananas frais livré à la MPU de Novembre à Décembre
P _{mango}	70	FCFA/kg	Prix moyen de la mangue fraîche livrée à la MPU de Mars à juin
P _{sugar}	650	FCFA/kg	Prix du sucre livré à la MPU
P _{lemon}	333	FCFA/kg	Prix du citron livré à la MPU
Y _{lemonjuice}	33%	Kg jus / kg citron frais	Rendement d'extraction du jus de citron

3.5. Coût mensuel en emballages

Pour déterminer les modalités possibles pour la variable « volume d'emballage », les caractéristiques de différents emballages (prix, forme, dimensions, propriétés thermiques...) ont été obtenues auprès de fournisseurs. Parmi les emballages recherchés (bouteille ou sachet de format individuel ou familial), les moins chers ont été sélectionnés.

Tableau A. 40 : Prix des emballages possibles

Produit fini p	Type d'emballage	Volume/quantité de produit fini par unité (V_{pack}^p)	P_{pack}^p Prix unitaire livré à la MPU (€)
Purée de gombo	Sachet souple	500 g	0.20
Purée de mangue		1000 g	0.29
Nectar de mangue	Bouteille en verre	330 ml	0.29
Jus d'ananas		1000 ml	0.57

Pour calculer le prix unitaire de chaque emballage livré à la MPU (P_{pack}^p , cf tableau A.40 ci-dessous), de nombreuses informations ont été utilisées (valeur EXW d'un container 20 pieds d'emballages, frais de transport international, taxes, frais de transport à l'intérieur du pays). A noter que pour prendre en compte le coût de transport des bouteilles depuis Abidjan vers la MPU, l'hypothèse était faite que le transport des bouteilles vides vers la MPU et le transport des bouteilles pleines vers le lieu de consommation (Abidjan) seraient effectué au cours d'un même aller-retour.

Le coût mensuel en emballage (MC_{pack}^p) était calculé à partir de la variable de conception (V_{pack}^p) comme suit :

$$MC_{pack}^p = \frac{Q_{8h}^p \times n_{8hshift/month}}{V_{pack}^p} \times P_{pack}^p \quad (eq. A. 51)$$

3.6. Calcul du coût mensuel des utilités

3.6.1. Coût mensuel en eau

Le coût mensuel (MC_{water}^p) était calculé en tenant compte des tarifs de l'eau fournie par la SODECI (cf tableau A.41 ci-dessous) en considérant que l'utilisateur est déjà raccordé au réseau. Pour chaque produit fini, la consommation bimensuelle d'eau (V_{watbim}^p) était calculée à partir de la consommation d'eau par rotation de 8h qui était estimée par le DES ($V_{water/8h}$, cf. partie 2.3) et du nombre mensuel de rotations.

Tableau A. 41 : Tarifs de la consommation d'eau en Côte d'Ivoire (SODECI)

Tranche de consommation bimensuelle (m ³)	Prix de l'eau (FCFA / m ³)	Description
$V_{watbim}^{SP} \leq 18$	250.3	Prix du m ³ d'eau au forfait social
$18 < V_{watbim}^{SP} \leq 72$	403.3	Prix du m ³ d'eau au forfait domestique
$72 < V_{watbim}^{SP}$	664	Prix du m ³ d'eau au forfait normal

3.6.2. Coût mensuel en électricité

Le tarif professionnel général basse tension de la CIE (cf tableau A.42 ci-dessous) a été utilisé pour calculer le coût mensuel en électricité (MC_{elec}^p).

Pour chaque produit fini, la consommation bimensuelle en électricité était calculée à partir du temps de fonctionnement de chaque équipement en considérant qu'ils fonctionnaient à 100% de leur puissance active lorsqu'ils étaient utilisés (cf. partie 2.3).

La puissance électrique souscrite (3, 6, 9, 12 ou 36 kVA) était calculée à partir de la puissance électrique totale (P_{elec}^p cf. partie 2.3) de la configuration correspondant au produit p, sans tenir compte des différences de voltage (220 ou 380 V ; monophasé ou triphasé).

Tableau A. 42 : Tarif professionnel général basse tension (CIE, 2020)

Description	Prix	Unité
Prime fixe bimensuelle en fonction de la puissance souscrite	1831,48	€ / kVA souscrit
Prix du kWh de la 1 ^{ère} tranche de facturation ($C_{elec}^{SP} \leq 180 \times P_{elec}^{SP}$)	101,84	€/kWh
Prix du kWh de la 2 ^{ème} Tranche de facturation ($C_{elec}^{SP} > 180 \times P_{elec}^{SP}$)	86,62	€/kWh
Redevance pour l'électrification rurale et les ordures ménagères	2,1	€/kWh
Redevance fixe pour la télévision publique RTI	2000	€

3.6.3. Coût mensuel en gaz

A partir de la quantité de gaz consommée mensuellement, le coût mensuel en gaz MC_{gaz}^p était calculé en considérant que la MPU était alimentée avec des bouteilles de butane de 12,5 kg pour lesquelles le coût de la recharge était de 5 200 FCFA.

3.7. Calcul du coût mensuel en main d'œuvre

Le coût mensuel de la main d'œuvre nécessaire pour produire un produit fini (MC_{lab}^p), nous avons considéré que l'utilisateur de la MPU s'occuperait des fonctions de direction, comptabilité/gestion et commerciales et qu'il emploierait 3 types de personnes pour opérer et faire fonctionner la MPU (cf salaires correspondant dans le tableau A.13 ci-dessous) :

- un gérant (responsable de l'approvisionnement en matières premières ainsi que de la qualité des produits finis),
- un chef d'équipe (responsable de la supervision des opérateur) par rotation de 8h
- les opérateurs des équipes 1 à 4. Pour rappel, le nombre d'opérateurs des équipes 1 et 2 étaient des variables de conception (cf tableau 20 dans le chapitre 6).

Tableau A. 43 : Nombre et salaire des différents employés de la MPU

Nombre	Poste	Coût total mensuel toutes charges comprises (FCFA/mois/personne)
1 / MPU	Gérant	180 000
1 / rotation de 8h	Chef d'équipe	145 000
$N_{OpT1}^p + N_{OpT2}^p + 2$ opérateurs pour les équipes n°3 et 4	Opérateurs	90 000

3.8. Calcul du chiffre d'affaire mensuel

Le chiffre d'affaire mensuel (MOR^p) a été calculé en tenant compte des prix unitaires auxquels les utilisateurs de la MPU pourraient vendre les produits finis (cf tableau A.44). Ceux-ci ont été estimés en tenant compte des prix de vente consommateurs relevés sur des produits similaires dans les grandes surfaces ivoiriennes ainsi que des marges des différents opérateurs de la chaîne de valeur aval (transport et distribution).

Tableau A. 44 : Prix de cession des produits finis sortie MPU

Produit	Format de l'emballage	Prix de cession sortie MPU (€/unité)
Okra Puree in stand up pouch	500 g	0,86
	1000 g	1,25
Mango Puree in stand up pouch	500 g	0,83
	1000 g	1,67
Mango Nectar in glass bottle	330 ml	0,5
	1000 ml	1,26
Pineapple Juice in glass bottle	330 ml	0,51
	1000 ml	1,28

Annexe n°2 – Modèles de préférence

1. Choix des seuils de désirabilité pour la qualité organoleptique

Pour les consommateurs africains, le gluant est le principal critère de qualité des sauces gombo. Parmi les indicateurs qui permettent de décrire la texture des purées de gombo (Savouré et al., 2020), le filant est l'indicateur qui permet de mieux prévoir le niveau de gluants des préparations gluantes. C'est cet indicateur qui a donc été utilisé comme indicateur de qualité des purées de gombo. Pour paramétrer la fonction de désirabilité de \overline{Q}_f^{OP} , en l'absence d'informations précises sur les seuils d'acceptabilité des consommateurs africains par rapport à la texture gluante du gombo, l'hypothèse a été faite que les consommateurs étaient satisfaits si la purée avait conservé 50 % du filant initial mais n'étaient pas satisfaits s'il en restait moins de 20 %.

Lors de la transformation de la mangue, un des principaux objectifs de production est de maintenir la couleur des purées et des nectars en limitant la dégradation des caroténoïdes (Vásquez-Caicedo et al., 2007). Ce critère a donc été choisi comme indicateur de qualité des purées et nectars de mangue. Les seuils de désirabilité ont été définis en se basant sur l'étude de (Godoy & Rodriguez-Amaya, 2007). Le seuil haut a été fixé à 6 % de pertes de caroténoïdes ce qui correspond aux pertes mesurées lors de l'élaboration d'une purée de mangue fraîche ; le seuil bas a été fixé à 64 % ce qui correspond aux pertes mesurées dans une purée de mangue pasteurisée conservée 2 ans en bouteille. Ces valeurs ont été utilisées pour paramétrer les fonctions de désirabilité associées aux indicateurs \overline{Q}_f^{MP} et de \overline{Q}_f^{MN} (tableau 19 du Chapitre 6).

Le brunissement non enzymatique et la destruction des pigments sont à l'origine de la dégradation de couleur du jus d'ananas pendant le traitement thermique (Chutintrasri & Noomhorm, 2007; Rattanathanalerk et al., 2005). Cette dégradation de couleur doit être maîtrisée. La différence totale de couleur (notée ΔE) est un indicateur de qualité qui permet de mesurer l'ampleur de la différence de couleur entre l'échantillon non traité (référence) et un échantillon pasteurisé. A partir des valeurs des paramètres « L » (Luminosité), « a » (rouge - vert) et « b » (jaune - bleu) de Hunter, mesurés sur l'échantillon traité (L, a, b), la valeur ΔE est calculée par rapport à la référence (L_0, a_0, b_0) grâce à l'équation 28. D'après (Pathare et al., 2013), les couleurs sont perçues comme étant nettement distinctes si $\Delta E > 3$, faiblement distinctes si $1,5 < \Delta E < 3$ et non-distinguables si $\Delta E < 1,5$. Ces seuils ont été utilisées pour paramétrer la fonction de désirabilité associée à l'indicateur de qualité du jus d'ananas \overline{Q}_f^{PJ} (tableau 19 du Chapitre 6).

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (eq. A. 52)$$

Annexe n°3– Résultats complémentaires de l'étude de cas

1. Performances des meilleures solutions

Les valeurs des différents indicateurs calculés pour la solution obtenue sont présentées dans le tableau A.45.

Tableau A. 45 : Performance indicator values of the resulting solution per final product (and corresponding IDI_k^p in brackets)

Design objectives	Performance indicator	Unit	Performance indicator values of the resulting solution per final product (and corresponding IDI_k^p)			
			Okra Puree	Mango Puree	Mango Nectar	Pineapple Juice
Economic viability	MOC	€/month	13250 (0.91)	14839 (0.9)	28888 (0.68)	35969 (0.33)
	MOP	€/month	-103 (0.07)	2529 (0.3)	1382 (0.12)	3568 (0.73)
	ROI	%	-0.8 (0.06)	17.0 (0.92)	4.8 (0.14)	9.9 (0.64)
Quality of final products	P_0	min	-	50 (0.3)	75 (0.6)	75 (0.6)
	F_0	min	6 (0.6)	-	-	-
	\bar{Q}_f	%	21.2 (0.11)	58.8 (0.32)	75.9 (0.77)	
		without unit	-	-	-	0.2 (0.96)
t_{prep}	min	136 (0.04)	91 (0.47)	68 (0.87)	89 (0.53)	
Operability in landlocked areas	P_{elec}	kW	4 (0.88)	6 (0.78)	5 (0.83)	6 (0.78)
	$Q_{gaz/8h}$	kg/8h shift	11 (0.9)	8 (0.91)	11 (0.9)	11 (0.91)
	$V_{water/8h}$	m ³ /8h shift	3 (0.82)	2.8 (0.84)	4.2 (0.43)	3.6 (0.66)
Ergonomics	$Q_{maxW/IP/8h}$	kg	89 (0.9)	101 (0.9)	241 (0.74)	164 (0.86)
	S_{floor}	m ²	22.6 (0.23)	19.5 (0.58)	18.7 (0.67)	25.8 (0.12)
Efficient of utility use	η_{elec}	kWh/kg	0.09 (0.86)	0.08 (0.87)	0.03 (0.91)	0.03 (0.91)
	η_{gas}	kg/kg	0.08 (0.8)	0.04 (0.91)	0.02 (0.93)	0.02 (0.94)
	η_{water}	L/kg	20.11 (0.75)	13.99 (0.87)	8.99 (0.91)	6.12 (0.92)

2. Analyse des décisions de conception associées à la solution obtenue

Le tableau A.46 présente quelle est la structure d'atelier (nombre et modèles d'équipements) de la solution obtenue et le tableau présente les conditions de pilotage obtenues pour chaque produit fini (volume d'emballage, conditions opératoires de la stabilisation thermique et nombre d'opérateurs nécessaire dans les équipes 1 et 2). Pour chaque variable de conception, il est également précisé si les 36 solutions les plus satisfaisantes (pour lesquelles $GDI_{AHP} > 0.24$) contiennent la même modalité que la solution obtenue ou bien si c'est le cas pour seulement une partie d'entre elles.

Tableau A. 46 : Combination of modalities selected for equipment variables and forming the resulting design solution. The consistency of the modalities contained in the resulting solution (s_{res}) was analysed by observing the characteristics of the possible equipment models and by observing the differences between the 36 most satisfying solutions.

Design variable	Modalities of s_{res}	Analysis of the consistency of the modalities contained in the resulting solution
Number of blanching vats	2 ^(c)	Par rapport aux combinaisons avec 1 modèle no 1 (50 L, 389 €, 31 min/batch, 33 kg/h ; 12 / 36 solutions) et avec 2 modèles no 4 (50 L, 629 €, 20 min/batch, 51 kg/h ; 7 / 36 solutions), la combinaison avec 2 modèles no 7 (30 L, 968 €, 13 min/batch, 46 kg/h) correspond aux 5 solutions qui ont le GDI_{AHP} le plus élevé et à 8 / 36 solutions. Comme le blanchiment est effectué uniquement pour la purée de gombo et que pour ce produit, la fonction t_{prep}^{OP} est très difficile à satisfaire, il est cohérent de choisir 2 modèles de blancheurs calorifugés et de petite capacité qui permettent des temps de cycles assez courts (bien que plus onéreux).
Model of blanching vat	no 7 ^(c)	
Number of cutters	1 ^(a)	Le modèle de cutter no 2 dispose de l'option vide, a une capacité intermédiaire (8 kg/batch) mais est assez onéreux (11 538 €). Ce choix va de pair avec le fait que le modèle de cuve d'homogénéisation no 6 ne dispose pas de l'option vide. Le choix de cette combinaison de 4 modalités est cohérent puisque le surcoût de l'option vide est plus important pour les cuves d'homogénéisation (surcoût d'environ 14 000 €) que pour les cutters (surcoût d'environ 8 000 €). Cette combinaison cutter-cuve d'homogénéisation permet d'effectuer la recette purée gombo no 2 (cf Figure 1).
Model of cutter	no 2 ^(a)	
Number of homogenisers	2 ^(a)	
Model of homogeniser	no 6 ^(a)	
Model of grinder	no 6 ^(a)	Comme $N_{cutter} = 1$, il n'était pas nécessaire que le grinder soit de type « grinder-cutter ». Parmi les grinder ne disposant pas de la fonction « cutting », le modèle de grinder no 6 est celui qui est le moins cher (850 €) et qui a la capacité la plus élevée (1000 kg/h).
Model of press	no 3 ^(a)	Le modèle de presse no 3 a le débit le plus élevé (entre 500 et 600 kg/h) et le coût le plus avantageux par rapport au débit permis.
Model of pulper	no 4 ^(a)	Le prix du modèle de raffineuse no 4 est modéré (5300 €) et son débit est suffisant par rapport aux autres équipements de la MPU (230 kg/h en tenant compte du temps de chargement/déchargement).
Model of filler	no 10 ^(c)	Par rapport aux 2 modèles correspondant à certaines des 36 solutions (1 / 36 solution avec le modèle no 5 ; 5 / 36 solutions avec le modèle no 11), le modèle no 10 (30 / 36 solutions) présente un meilleur compromis entre son prix (6145 €), la surface au sol qu'il occupe (0.375 m ²) et la capacité de sa trémie (30 L). Comme ces 3 modèles n'étaient pas de type « filler-screw », il est cohérent que $N_{capp} = 1$.
Number of screw cappers	1 ^(a)	
Model of vacuum sealer	no 1 ^(c)	Par rapport à l'autre modèle possible (4 / 36 solutions pour le modèle no 2), le modèle no 1 (32 / 36 solutions) est légèrement moins onéreux (4180 € contre 4225 €). Leurs autres caractéristiques sont identiques.
Number of autoclaves	2 ^(a)	Avec 2 autoclaves de moyenne capacité (124 4/4 pour le modèle no 11), le temps de préparation d'un lot avec la MPU (t_{prep}^P) est plus faible et la capacité de production par rotation est plus importante que si la MPU obtenue ne contenait qu'un seul autoclave de grande capacité (par exemple le modèle no 12 ayant une capacité de 240 4/4). Par rapport au modèle no 9 qui a une capacité légèrement supérieure (150 4/4 pour le no 9 ; 124 4/4 pour le no 11), qui est moins onéreux (27 835 € pour le no 9 ; 42 993 € pour le no 11) et qui a une vitesse de montée en température identique (3,5 °C/min), le modèle no 11 consomme beaucoup moins d'eau (environ 65 L pour le chauffage et 620 L pour le refroidissement pour le no 11 ; environ 210 L pour le chauffage et 1215 L pour le refroidissement pour le no 9) et beaucoup moins de gaz (3.6 kg/h pour le no 11 ; 9.0 kg/h pour le no 9). Cela s'explique par la présence d'une pompe de recyclage-aspersion dans le modèle no 11 (alors que la pompe du modèle no 9 permet seulement le recyclage).
Model of autoclave	no 11 ^(a)	
^(a) : modalities of all 36 most satisfying solutions ($GDI_{AHP} > 0.240$) ^(b) : modalities of all 17 most satisfying solutions ($GDI_{AHP} > 0.245$) ^(c) : modalities of all 3 most satisfying solutions ($GDI_{AHP} > 0.25$) ^(d) : modalities not shared by the 3 most satisfying solutions		

Tableau A. 47 : Combination of modalities selected for control variables and forming the resulting design solution. The consistency of the modalities contained in the resulting solution (s_{res}) was analysed by observing the characteristics of the possible equipment models and by observing the differences between the 36 most satisfying solutions.

Design variable		Modalities of s_{res}	Analysis of the consistency of the modalities contained in the resulting solution
Packaging volume	OP	500 g ^(a)	Par rapport au format 1000 g, le format 500 g permet un temps de cycle dans l'autoclave (model no 11, $F_0^{OP} = 6$ min et $T_{hold}^{OP} = 125$ °C) plus court (205 min vs. 264 min) et permet de mieux préserver la qualité organoleptique du gombo (21 % vs. 15 %).
	MP	1000 g ^(a)	Par rapport aux petits formats (500 g ou 330 ml), les formats familiaux (1000 g ou 1000 ml) permettent d'avoir un meilleur débit pour l'UO de remplissage des emballages (environ 500 L/h pour les bouteilles de 1000 mL au lieu de 200 L/h pour les bouteilles de 330 mL ; environ 400 kg/h pour les sachets de 1000 g au lieu de 260 kg/h pour les sachets de 500 g) et pour l'UO de scellage des emballages (environ 400 L/h pour les bouteilles de 1000 ml au lieu de 130 L/h pour les bouteilles de 330 mL ; environ 160 kg/h pour les sachets de 1000 g au lieu de 80 kg/h pour les sachets de 500 g).
	MN	1000 mL ^(a)	
	PJ	1000 mL ^(a)	
Sterilization Temperature	OP	125 °C ^(a)	Pour la purée de gombo, la purée de mangue et le nectar de mangue, la température de traitement thermique la plus élevée permet de minimiser le temps de cycle dans l'autoclave tout en préservant la qualité des produits (cf. Figure 10).
Pasteurization Temperature	MP	90 °C ^(a)	
	MN	90 °C ^(a)	
Pasteurization Temperature	PJ	80 °C ^(a)	Le faible effet de T_{hold}^{PJ} sur t_{stab}^{PJ} et sur $\overline{Q_f^{PJ}}$ du jus d'ananas (cf. Figure 10) peut expliquer pourquoi c'est la plus petite valeur possible (80 °C) qui a été retenue. Cependant, la valeur la plus élevée (90°C) aurait été plus cohérente.
	Sterilization value	OP	6 min ^(d)
Pasteurization value	MP	50 min ^(b)	Pour le nectar de mangue ($P_0^{MN} = 75$ min), les 36 solutions les plus satisfaisantes correspondaient toutes à la valeur pasteurisatrice intermédiaire ($P_0^{MN} = 75$ min). Pour la purée de mangue $P_0^{MP} = 50$ min et pour le jus d'ananas $P_0^{PJ} = 75$ min, mais pour ces produits 3 / 36 solutions correspondaient à une valeur pasteurisatrice supérieure (75 min pour la purée de mangue et 100 min pour le jus d'ananas).
	MN	75 min ^(a)	
	PJ	75 min ^(d)	
Number of operators in Team n°1 (washing, sorting and trimming)	OP	3 ^(c)	Le diagramme de gantt visible de la Figures 9A montre que pour traiter les 46 kg/h de gombo de s_{res} , il est suffisant d'avoir 3 opérateurs dans l'équipe n°1 (ce qui correspond à 21/36 solutions) plutôt que 4 (11/36 solutions).
	MP	3 ^(a)	Les diagrammes de gantt des Figures 9B et 9D montrent que même si le débit entrant de mangue n'est pas le même pour la purée et le nectar de mangue ($\dot{m}_{in}^{MP}(s_{res}) = 88$ kg/h; $\dot{m}_{in}^{MN}(s_{res}) = 56$ kg/h), il est cohérent que 3 opérateurs soient nécessaires dans l'équipe 1.
	MN	3 ^(a)	
	PJ	6 ^(c)	Le diagramme de gantt visible de la Figures 9C montre que pour traiter les 243 kg/h d'ananas de s_{res} , il est nécessaire d'avoir 6 opérateurs dans l'équipe n°1 (ce qui correspond à 31 / 36 solutions) plutôt que 5 (5 / 36 solutions).
Number of operators in Team n°2 (extraction and homogenisation)	OP	5 ^(c)	Comme la solution obtenue contient 2 blancheurs (plutôt qu'un seul) et donc 5 postes de travail pour l'équipe d'extraction-homogénéisation (cf Figures 9A), il est cohérent que $N_{OpT2}^{OP} = 5$ (ce qui correspond à 24 / 36 solutions) plutôt que $N_{OpT2}^{OP} = 4$ (ce qui correspond à 12 / 36 solutions).
	MP	3 ^(a)	L'observation des diagrammes de gantt des Figures 9B, 9C et 9D montre qu'il est cohérent que l'équipe d'extraction-homogénéisation soit composée de 3 opérateurs pour la purée de mangue, de 2 opérateurs pour le nectar de mangue et de 5 opérateurs pour le jus d'ananas.
	MN	2 ^(a)	
	PJ	5 ^(a)	

(a): modalities of all 36 most satisfying solutions ($GDI_{AHP} > 0.240$)

(b): modalities of all 17 most satisfying solutions ($GDI_{AHP} > 0.245$)

(c): modalities of all 3 most satisfying solutions ($GDI_{AHP} > 0.25$)

(d): modalities not shared by the 3 most satisfying solutions

3. Priorisation des améliorations possibles

Le tableau A.48 présente les améliorations identifiées au cours de la visualisation et de l'analyse des résultats. Elles ont été priorisées en tenant compte du rapport entre leur utilité potentielle pour la décision de conception et du coût de leur mise en œuvre.

Tableau A. 48 : Description et priorisation des améliorations possibles en tenant compte du rapport entre leur utilité potentielle pour la décision de conception (amélioration du degré de satisfaction, de la cohérence et de la faisabilité de la solution obtenue) et du coût de leur mise en œuvre (manipulations expérimentales, temps nécessaire pour modifier l'outil etc). L'échelle qui a été utilisée pour quantifier l'utilité et le coût des améliorations possibles est la suivante : 1 = Très faible ; 2 = Faible ; 3 = Moyen ; 4 = Elevé ; 5 = Très élevé.

Améliorations possibles				Utilité (U) potentielle pour la décision de conception	Coût (C) engendré par la vérification/l'a amélioration	Ratio U/C
ID	Modèle / niveau concerné	Type	Description			
1	Préférences	Modification du paramétrage de l'outil	Modifier l'importance relative (w_p) accordée à la purée de gombo et aux 3 autres produits finis lors du calcul du GD_{IAP} .	5	1	5,0
2	Opération unitaire	Validation expérimentale	Réaliser des essais pour valider expérimentalement que les barèmes qui ont été prédits par le modèle de stabilisation thermique permettent de garantir la qualité sanitaire des produits finis et permettent de préserver un niveau de qualité organoleptique et nutritionnel acceptable pour le consommateur.	5	3	1,7
3	Variables de conception	Vérification des modèles et des hypothèses	Réaliser des essais chez les équipementiers pour vérifier expérimentalement que par rapport à la pompe de circulation du modèle d'autoclave no 9, la pompe de recyclage-aspersion du modèle d'autoclave no 11 permet de réaliser de significatives économies d'eau et de gaz.	5	3	1,7
4	Procédé	Amélioration des modèles de simulation	Améliorer la gestion du lancement de lot "juste à temps" par le DES.	5	3	1,7
5	Atelier	Vérification des modèles et des hypothèses	Vérifier les hypothèses et les modèles impliqués dans l'estimation des coûts logistiques pour approvisionner la MPU en emballages et pour distribuer les produits finis.	3	2	1,5
6	Variables de conception	Ajout de variables de conception	Contacteur des fournisseurs de blancheurs et de cutters pour identifier les modèles de blancheur et de cutter à ajouter comme modalités possibles, et collecter leurs caractéristiques techniques	3	2	1,5
7	Atelier	Vérification des modèles et des hypothèses	Consulter des transformateurs ivoiriens pour vérifier que les hypothèses effectuées sur l'organisation des campagnes de production (2 mois / campagne; 6 jours de production / semaine; 2 rotation de 8h / jour) sont réalistes dans le contexte du scénario d'utilisation.	4	3	1,3
8	Opération unitaire	Identification expérimentale de paramètres	Réaliser des essais pour mesurer les temps de chargement, d'exécution et de chargement des blancheurs et des cutters.	4	3	1,3
9	Préférences	Vérification des modèles et des hypothèses	Réaliser des essais pour vérifier s'il est possible d'obtenir une purée de gombo de qualité acceptable pour le consommateur avec $t_{prep}^{OP} = 120$ min.	4	4	1,0
10	Procédé	Amélioration des modèles de simulation	Modifier la gestion du temps de travail de l'équipe n°4 par le DES afin que l'estimation de la capacité de production par rotation dépende moins strictement du temps de travail de l'équipe n°4	3	3	1,0
11	Préférences	Vérification des modèles et des hypothèses	Consulter des experts et/ou la littérature pour vérifier les seuils de désirabilité associés à l'indicateur $Q_{gaz/8h}$	2	2	1,0
12	Variables de conception	Modification du paramétrage de l'outil	Fixer les valeurs de T_{hold}^p , de P_0^p et de F_0^p	1	1	1,0
13	Préférences	Identification expérimentale de paramètres	Réaliser des essais et une analyse sensorielle pour identifier expérimentalement les seuils de désirabilité associés à l'indicateur \overline{Q}_r^p	4	5	0,8