



Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées

Paola Labaky

► To cite this version:

Paola Labaky. Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées. Autre. Université Montpellier; Université Saint-Joseph (Beyrouth), 2021. Français. NNT : 2021MONTG066 . tel-03605550

HAL Id: tel-03605550

<https://theses.hal.science/tel-03605550>

Submitted on 11 Mar 2022

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

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



UNIVERSITÉ SAINT-JOSEPH
FACULTÉ DES SCIENCES

THÈSE DE DOCTORAT

DISCIPLINE : CHIMIE

SPÉCIALITÉ : BIOCHIMIE ET PHYSICO-CHIMIE ALIMENTAIRE

Sujet de la thèse :

**Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche
et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour
l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées**

Présentée par :

LABAKY Paola

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR ÈS SCIENCES

*Dans le cadre d'une convention de cotutelle internationale avec l'Université
de Montpellier, France*

Devant le jury composé de :

Pr. Richard Maroun
Dr. Zoulikha Rezzoug
Pr. Paul Menut
Dr. Hiba Rajha
Dr. Layal Dahdouh
Dr. Lidwine Grosmaire
Pr. Nicolas Louka
Pr. Christelle Wisniewski

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Encadrante
Encadrante
Directeur de thèse
Directrice de thèse

M. Julien Ricci
Dr. Dominique Pallet

Invité
Invité

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Biochimie et Physico-chimie alimentaire

École doctorale GAIA

Unité de recherche UMR QualiSud

En partenariat international avec la Faculté des Sciences de l'université Saint-Joseph de Beyrouth, LIBAN

Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées

Présentée par Paola LABAKY

Sous la direction de Nicolas LOUKA et Christelle WISNIEWSKI

Devant le jury composé de

M. Richard MAROUN, Professeur, Université Saint-Joseph de Beyrouth, Liban	Président
Mme Zoulikha REZZOUG, Maître de conférences, (HDR), Université La Rochelle, France	Rapporteur
M. Paul MENUT, Professeur, AgroParisTech Paris, France	Rapporteur
Mme Hiba RAJHA, Maître de conférences, Université Saint-Joseph de Beyrouth, Liban	Examinatrice
Mme Loyal DAHDOUH, Chercheur CIRAD, Montpellier, France	Encadrante
Mme Lidwine GROSMARE, Maître de conférences, Université de Montpellier, France	Encadrante
Mme Christelle WISNIEWSKI, Professeur, Université de Montpellier, France	Directrice
M. Nicolas LOUKA, Professeur, Université Saint-Joseph de Beyrouth, Liban	Directeur
M. Julien Ricci, Ingénieur d'étude CIRAD, Montpellier, France	Invité
M. Dominique Pallet, Directeur de l'UMR QUALISUD CIRAD, Montpellier, France	Invité



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

À mes chers parents, Rachid et Joumana, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

À mon frère et ma sœur, Marc et Tara, pour leur appui et leur encouragement.

À ma Grand-mère, Marie, qui nous a quitté cette année et qui jette un œil sur moi de très haut, pour ta tendresse, ta gentillesse et ton amour.

Cette thèse est pour toi, Téta.

À toute ma famille et mes amis.

À tous ceux qui ont cru en moi.

Remerciements

Cette thèse a été pour moi une épreuve assez enrichissante tant personnellement que professionnellement. Malgré les quelques difficultés rencontrées, j'ai beaucoup appris sur moi-même et je ne garderai que d'agréables souvenirs ! Cette expérience inoubliable marque une des plus belles pages de ma vie et commence ma nouvelle et jeune expérience de chercheuse.

J'exprime toute ma gratitude et reconnaissance aux personnes qui ont contribué, tout au long de mes études, à la réussite et réalisation de ce travail, mais surtout à l'ouverture de mon esprit sur le monde et sur les autres.

Je remercie en premier lieu la Fondation Agropolis qui a financé ma thèse dans le cadre du projet Interfaces, période 2017-2020.

Mes plus profonds remerciements et toute ma reconnaissance s'adressent à mon directeur de thèse Nicolas Louka qui m'a donné l'opportunité de vivre cette expérience unique et la chance de réaliser ce travail de thèse. Je vous remercie pour la confiance que vous m'avez témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Votre présence, vos compétences et votre rigueur scientifique et intellectuelle m'ont permis d'arriver au bout de ma thèse. Je tiens à vous remercier pour tout ce que vous avez fait pour moi et pour vos conseils durant la rédaction de mes articles et de mon manuscrit.

J'exprime également mes plus sincères remerciements, à ma très douce directrice de thèse Christelle Wisniewski pour son aide, sa bienveillance et son soutien durant cette thèse. Merci pour tes relectures scrupuleuses, tes conseils pertinents, tes remarques qui ont permis d'enrichir mes compétences et tes suggestions toujours avisées. J'ai toujours senti dans ton regard un encouragement et une grande confiance. Merci pour ta compréhension et tout le côté humain qui m'ont permis de réaliser cette thèse sereinement. Et surtout merci de t'être autant investi dans mon travail.

Mes vifs remerciements s'adressent à Layal Dahdouh ma « super » encadrante de thèse qui a toujours été présente à mes côtés pour me guider, m'aider et m'orienter. Tu m'as permis d'approfondir au maximum mes travaux afin de pouvoir être fier aujourd'hui du travail réalisé ! J'ai beaucoup apprécié nos échanges, tes conseils, ta patience et ton soutien. Merci pour ta générosité, ta sérénité et ta grande disponibilité et pour avoir été là pour moi pendant cette période. Merci pour ton aide dans la rédaction des articles et pour tes nombreuses relectures de la thèse. Ce que tu m'as appris pendant ma thèse dépasse largement le cadre scientifique !

J'aimerais pareillement remercier chaleureusement ma co-encadrante de thèse, Lidwine Grosmaire pour son sourire, sa disponibilité, sa présence rayonnante, son enthousiasme, sa bonne humeur et son implication. Je te remercie pour tes conseils et tes remarques qui m'ont aidé à orienter mes réflexions dans le bon sens. Merci pour ton soutien de tous les instants ! Merci de m'avoir aidé à surmonter les difficultés que j'ai vécues et de m'avoir soutenu quand le moral était moins là. Je n'oublierai jamais tes « NO PANIC, c'est impec ! » qui n'ont fait que me remotivé dans les moments de doute. Merci de m'avoir amenée là où j'en suis aujourd'hui et de m'avoir aidée à m'épanouir pleinement.

Julien, merci d'avoir pris du temps pour m'apporter ton aide et tes conseils sur mon travail. J'ai vraiment apprécié nos discussions assez enrichissantes, ton avis et tes conseils. Je pense que tu as beaucoup contribué à ce que le résultat final ait cette forme aujourd'hui. Sans tes efforts et ton soutien, je n'aurais pas été en mesure de réaliser ce travail de thèse !

Je voudrais également remercier les membres de mon comité de thèse : Cassandre Leverrier, Christophe Bugaud, Fabrice Davrieux, Stephan Peyron et Sylvie Bureau. Vos commentaires ainsi que nos discussions ont été très bénéfiques pour moi, pour avancer et progresser. Merci d'avoir apporté un regard sur mon travail et de s'être assuré que ma thèse se déroulait dans les meilleures conditions.

Je remercie Monsieur Richard Maroun, Doyen de la faculté des Sciences à l'Université Saint-Joseph de Beyrouth d'avoir accepté de présider ce jury de thèse. J'exprime toute ma gratitude à Madame Zoulikha Rezzoug, enseignant-chercheur à l'Université la Rochelle, et à Monsieur Paul Menut, professeur à Agroparistech, rapporteurs de cette thèse, qui me font l'honneur de partager leurs jugements de ce travail. Je remercie Madame Hiba Rajha, enseignante-chercheuse à l'École Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth à l'Université Saint-Joseph qui me fait l'honneur d'examiner mes travaux de thèse.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe du projet Interfaces ! J'ai eu tellement de chance de travailler et d'échanger mes résultats avec vous. Les nombreuses discussions et suggestions d'amélioration lors des assemblées générales m'ont permis de mieux maîtriser mon sujet et d'avancer dans la bonne direction. J'adresse également un remerciement particulier à Dominique Pallet, Directeur de l'Unité Mixte de Recherche QualiSud et responsable du projet Interfaces pour avoir accepté de faire partie de mon Jury de thèse en tant qu'invité.

J'adresse tous mes remerciements au personnel de l'équipe 3 de l'UMR QualiSud « les irréductibles », pour leur accueil chaleureux. Je remercie plus particulièrement Jean-Michel Meot et Michel Rivier pour leurs oreilles attentives et réconfortantes. Je vous remercie d'avoir

Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées

veillé sur moi durant ces trois ans de thèse ! Anaïs, merci de m'avoir toujours facilité les tâches administratives !

Un merci particulier aux personnes avec qui j'ai partagé un quotidien agréable : Nuria, mi encantadora amiga, sans toi le labo ne serait pas le même ! Merci pour ta bonne humeur, tes rires et tes blagues. Merci pour les heures que tu as passé à m'apprendre l'espagnol et me faire rêver du Mexique. J'espère pouvoir te rendre visite un jour !

Camille, merci d'avoir été la ! J'ai adoré partager le bureau avec toi ! Merci pour nos longues discussions et rires ! Merci pour ton écoute, je te souhaite un très bon courage pour la suite de ta thèse.

Alioune 'Lupin', mon partenaire de projet ! Je n'oublierai jamais la phrase que tu me répétais toujours « Paola, la reine de la Mangue ». Merci d'avoir été à mes côtés pour m'aider dans mes travaux et pour me soutenir à tout moment.

Andres, Alejandro, Anaïs, Charlotte, Églantine, Francisco, Milena, Mussole, Laurent, Léa, Timoty, et j'en oublie certainement ... Merci pour tous les moments que j'ai vécu avec vous ! Vous avez rendu ces trois années uniques !

Merci à tous ceux qui m'ont aidé à un moment ou à un autre : Éric Rondet, Léa Ollier et Jean-Paul Fleuriot.

J'aimerais remercier Pierre et Anne Marie Caron, propriétaires du logement que je louais à Montpellier. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi. Vous m'avez toujours considérée comme votre fille et m'avez témoigné beaucoup d'affection. J'ai été extrêmement sensible à vos qualités humaines et je ne pourrai garder en souvenir que des moments exceptionnels à vos côtés.

Un énorme merci à mes amis en France Antoine, Arnaud, Charlène, Lucile et Teko, vous étiez pour moi une famille, merci pour tout ce que vous m'avez généreusement offert. Votre attention, votre aide, votre présence rayonnante, m'ont aidé à surmonter les difficultés de la vie à l'étranger. J'espère que l'on pourra maintenir notre amitié tellement riche en souvenirs !

Charlotte, je ne serais jamais capable de t'exprimer combien je suis ravie de t'avoir connue et te dire combien tu comptes pour moi. Merci pour ton sourire et ta folie. Merci pour nos discussions, pour nos rires, pour nos pause-café et pour nos soirées. Merci de m'avoir rendu meilleure et de m'avoir aidé à épanouir ! Notre amitié dépasse trop largement ce cadre pour que je puisse vraiment l'exprimer ici, elle m'est très précieuse et m'a beaucoup aidé pendant ces trois années. Merci.

Camille, Jeremy et Remy, j'ai eu le plaisir de faire votre connaissance ! Merci de m'avoir toujours invité pour passer de très bons moments avec vous.

Merci à mes amis au Liban Carine, Charbel, Elias, David, Grace, Georges, Jean-Pierre, Joanne, Lenny, Loulwa, Mirabelle, Michelle, Michelle, Marc, Ralph, Sara et Tonia bien que je n'aie pas pu vous voir assez durant ma thèse à cause de mes longs séjours en France, vous étiez toujours une source d'encouragement. Merci pour votre soutien.

Un merci particulier à une personne qui m'a accordé une attention sincère, Hussein, ta présence a adoucis mes derniers jours de thèse. Merci pour les moments que nous avons partagés ensemble.

Enfin, mes plus sincères remerciements vont à mes parents, mon frère et ma sœur. Papa et maman merci pour votre amour inconditionnel, pour tous vos sacrifices qui m'ont permis de réaliser mes rêves et pour votre fierté. Marc et Tara, vous m'avez porté chance ! Merci de m'avoir supporté ces trois ans ! Je vous aime.

Résumé/ Abstract

Résumé

Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées.

La mangue est un fruit tropical caractérisé par une production saisonnière abondante entraînant chaque année d'importantes pertes post-récolte. Ainsi, la transformation de la mangue en purée ou produit séché pourrait constituer une alternative pour réduire ces pertes et améliorer l'économie locale des pays producteurs (Afrique de l'Ouest, Brésil, etc.). Cependant, le manque de connaissances et d'outils instrumentaux utiles au choix du type de transformation à privilégier selon la nature du fruit, constitue un verrou pour la maîtrise de l'itinéraire de transformation et de la qualité des produits transformés.

Dans ce contexte, le travail proposé repose, d'une part, sur l'étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche qui permettraient de prédire la qualité de purées de mangues, et, d'autre part, sur la pertinence et l'optimisation d'un procédé innovant de texturation (IVDV pour Intensification de la Vaporisation par Détente vers le Vide) afin d'améliorer la qualité des produits séchés.

La première partie du travail avait ainsi pour objectif (i) d'étudier l'impact de la maturation sur les propriétés physiques et biochimiques des mangues et des purées de mangues, (ii) d'identifier les relations entre les propriétés des mangues fraîches et celles des purées pour choisir les indicateurs pertinents permettant d'anticiper les propriétés de ces dernières et (iii) de proposer un test simple, rapide et non-destructif qui pourrait être utilisé comme outil de tri des mangues fraîches dans des unités de transformation. L'effet du mûrissement sur les propriétés physiques des purées de mangues a été étudié au travers de mesures physiques, physico-chimiques, rhéologiques et spectrales. L'intérêt du couplage rhéologie/moyen-IR, méthodologie innovante, permettant d'obtenir simultanément des informations rhéologiques et biochimiques combinées et ne nécessitant qu'un échantillon de taille réduite, a été souligné. Les résultats ont montré que la maturation régit les propriétés physiques, physico-chimiques et biochimiques des purées de mangues durant les 10 premiers jours. La fermeté des mangues étant un excellent indicateur de cette maturation, un simple test non destructif de compression sur des mangues fraîches est ainsi susceptible d'anticiper les propriétés physiques des purées obtenues après broyage du fruit frais.

La deuxième partie du travail avait pour objectif de proposer une nouvelle voie de valorisation de la mangue séchée sous forme de produit croustillant, et ce à partir d'un nouveau procédé de texturation (IVDV). L'optimisation de ce procédé a été recherchée, notamment pour des mangues au stade avancé de mûrissement, car constituant la principale source des pertes post-récolte. L'effet des paramètres de traitement (pression de vapeur saturante, teneur en eau initiale et durée de l'opération) sur le taux d'expansion, la texture et la couleur des mangues séchées, a été étudié au travers d'un plan d'expériences et d'une méthodologie de surface de réponse. Les résultats obtenus ont confirmé que le procédé de texturation IVDV a la possibilité d'améliorer la qualité des mangues séchées en corrigeant certains défauts (texture et couleur). Il a ainsi été démontré que ce nouveau procédé thermomécanique s'avère extrêmement prometteur et offre aux transformateurs une nouvelle voie de valorisation des mangues, notamment celles dont le stade de maturation est particulièrement avancé, permettant par conséquent une réduction des pertes post-récolte. Les travaux réalisés au cours de cette thèse s'inscrivent dans les activités du projet INTERFACES (porté par le CIRAD et l'INRAE, et financé par la Fondation Agropolis), dans le cadre d'un contrat doctoral en cotutelle entre l'Université de Montpellier et l'Université Saint-Joseph de Beyrouth.

Abstract

Study of new quality markers of fresh mango and of an innovative texturing process (IVDV) for the optimization of the quality of purees and dried mangos.

Mango is a tropical fruit characterized by an abundant seasonal production leading to significant post-harvest losses each year. Thus, the transformation of mango into puree or dried product, could be an alternative to reduce these losses and improve the local economy of producing countries (West Africa, Brazil, etc.). However, the lack of knowledge and instrumental tools useful for choosing the privileged type of processing according to the nature of the fruit, constitutes a barrier for controlling the processing route and the quality of the processed products.

In this context, the proposed work is based, on the first hand, on the study of new quality markers of fresh mango that would allow to predict the quality of mango purees, and, on the other hand, on the relevance and optimization of an innovative texturing process (IVDV, Intensification of Vaporization by decompression to the Vacuum) in order to improve the quality of dried products.

The first part of this work aimed (i) to study the impact of ripening on the physical and biochemical properties of mangos and mango purees, (ii) to identify the relationships between the properties of fresh mangos and those of purees in order to choose the relevant indicators to anticipate the properties of the latter and (iii) to propose a simple, fast and non-destructive test that could be used as a sorting tool for fresh mangos in processing units. The effect of ripening on the physical properties of mango purees was studied through physical, physicochemical, rheological and spectral measurements. The interest of using the coupled rheology/ FTIR spectroscopy as innovative methodology, allowing to obtain simultaneously rheological and biochemical information combined and requiring only a small sample size, was underlined. The results showed that ripening governs the physical, physicochemical and biochemical properties of mango purees during the first 10 days. In addition, since the firmness of the mangos was an excellent indicator of the ripening, a simple non-destructive compression test on fresh mangos is likely to anticipate the physical properties of the purees obtained after grinding the fresh fruit. The second part of this work aimed at proposing a new way of valorization of dried mango in the form of a crispy product, using a new texturing process: IVDV. The optimization of this process was sought, in particular for mangos at the advanced stage of ripening, because it

constitutes the main source of post-harvest losses. The effect of treatment parameters (saturated steam pressure, initial water content and treatment time) on the expansion ratio, texture and color of dried mangos was studied through an experimental design and a response surface methodology. The obtained results confirmed that the IVDV texturing process has the potential to improve the quality of dried mangos by correcting some defects (texture and color). Thus, it was demonstrated that this new thermomechanical process is extremely promising and offers to the processors a new way of valorization of mangos, in particular those presenting an advanced stage of maturation, allowing consequently a reduction of the post-harvest losses.

The work carried out during this thesis took part of the activities of the INTERFACES project (supported by CIRAD and INRAE, and financed by the Agropolis Foundation), within the framework of a doctoral contract in co-supervision between the University of Montpellier and the Saint-Joseph University of Beirut.

Valorisation

Publications dans revues à comité de lecture

Labaky, P., Dahdouh, L., Ricci, J., Wisniewski, C., Louka, N., and Grosmaire, L. (2021) Impact of ripening on the physical properties of mango purees and application of simultaneous rheometry and *in situ* FTIR spectroscopy for rapid identification of biochemical and rheological changes, *Journal of Food Engineering*, 300, 110507.

Labaky, P., Grosmaire, L., Ricci, J., Wisniewski, C., Louka, N., and Dahdouh, L. (2020) Innovative non-destructive sorting technique for juicy stone fruits: textural properties of fresh mangos and purees, *Food and Bioproducts Processing*, 123, 188-198.

Projet de publication dans revues à comité de lecture (en cours de finalisation)

Labaky, P., Rajha, H., Dahdouh, L., Ricci, J., Delpech, C., Khoury, A., Grosmaire, L., Wisniewski, C., and Louka, N.

Physicochemical properties improving of dried mango cubes, using of a novel technology “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV) combine with conventional hot-air drying, *Food Chemistry*.

Communications dans congrès internationaux

Communications orales

Labaky, P., Grosmaire, L., Ricci, J., Wisniewski, C., Louka, N., and Dahdouh, L. Rheological and spectral approaches for up-grading mangos through puree making, 54ème Congrès du groupe Français de Rhéologie GFR, 23 – 25 October 2019, Montpellier, France.

Labaky, P., Dahdouh, L., Ricci, J., Wisniewski, C., Louka, N., and Grosmaire, L. Innovative physical and spectral approaches to monitor mango selection: puree making, F&V Processing 2020 - Third Symposium on Fruit and Vegetable Processing, 24 – 25 November 2020, Avignon, France.

Communications par affiche

Labaky, P., Grosmaire, L., Ricci, J., Wisniewski, C., Louka, N., and Dahdouh, L. Innovative selection strategy of fresh mangos: Up-grading mangos through puree making, 33rd EFFoST International Conference 2019, 12 - 14 November 2019, Rotterdam, The Netherlands.

Table des illustrations

Liste des Figures

Liste des Figures du manuscrit

Figure 1. Classification du manguiers de l'espèce <i>Indica</i> (K. Shah et al., 2010).	9
Figure 2 : Anatomie de la mangue avec l'exocarpe, le mésocarpe et l'endocarpe.	10
Figure 3. Le cycle de croissance de la mangue (Tharanathan et al., 2006).	12
Figure 4 : Évolution et prédiction (2000-2028) de la production mondiale de la mangue et d'autres fruits tropicaux (F. and A. O. of U. N. FAO, 2019).	14
Figure 5 : Les principales variétés de mangues retrouvées sur le marché européen (Evans et al., 2017).	15
Figure 6 : Schéma de la paroi cellulaire végétale, inspirée de (Dejean, 2011).	28
Figure 7 : Schéma de la structure des pectines (Flutto, 2003).	29
Figure 8 : Géométries utilisées pour les mesures rhéologiques des suspensions de fruit (a) la géométrie de type ailette et (b) les cylindres coaxiaux.	35
Figure 9 : Schéma représentant les transferts de chaleur et de matière lors d'un séchage par entraînement (Rivier et al., 2009).	40
Figure 10 : Cinétique de séchage : représentation de l'évolution de la teneur en eau W en fonction du temps (t), permettant de calculer les vitesses de séchage.	42
Figure 11 : Schéma du réacteur de traitement IVDV (Abi-Khattar et al., 2020): (A) : chambre de traitement ; (B) : réservoir sous vide ; (C) pompe à vide ; (D) : système de génération rapide de vapeur ; (E) : système d'augmentation de la pression à ultra-vitesse ; (a) : vanne d'injection d'air ambiant ; (b) : vanne de sortie ; (f) : vanne d'entrée de la vapeur ; (m) : manomètre ; (V) : vanne pneumatique de décompression rapide ; cv : valve de connexion ; nv : valve de non-retour.	48
Figure 12 : Le profil pression-temps du cycle de traitement par IVDV ; a: échantillon dans la chambre de traitement à pression atmosphérique; b: décompression vers le vide dans la chambre de traitement ($\sim 0,01$ s) ; c: séjour sous vide pendant quelques secondes ; d: montée ultra rapide en pression de vapeur (avec un $\Delta P/\Delta t$ supérieur à 12.10^5 Pa/s) pour atteindre la pression P de traitement ; e: temps de traitement sous haute pression et haute température; f : phase de détente ($< 0,02$ s); g: séjour sous vide de 2 à 3 s suivi d'une douche d'air de quelques secondes ; h: retour à la pression atmosphérique dans la chambre de traitement et récupération du produit.	50
Figure 13 : Représentation de la cinétique de séchage ; La courbe verte représente une courbe typique du séchage convectif et la courbe en orange représente une courbe de séchage après texturation par IVDV.	51
Figure 14 : Représentation du test de compression effectué sur une face de la mangue.	56
Figure 15 : Évolution de la distance parcourue par la sonde pour atteindre 5 N (D_{5N}) en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre 10 N (D_{10N}) pour (a) la première face et (b) la deuxième face de la mangue.	57
Figure 16 : Représentation du test de pénétrométrie effectué sur la partie interne d'une tranche de mangue de 15 mm d'épaisseur.	58
Figure 17 : Entrefers (a) de la géométrie des cylindres coaxiaux (B-CC18.92-40/118, diamètre 18,92 mm) ($h = 16$ mm, $R_i = 9,46$ mm, $R_e = 14,35$ mm et entrefer = 4,89 mm) et (b) de la géométrie à 6 ailettes (ST22- 6V- 16, diamètre de 22 mm) ($h = 16$ mm, $R_i = 11$ mm, $R_e = 14,35$ mm et entrefer = 3,35 mm), utilisées pour les mesures rhéologiques conventionnelles en écoulement et en dynamique.	65
Figure 18 : Effet du pré-cisaillement et de temps repos sur les propriétés rhéologiques des purées de mangue lors de l'insertion de deux géométries. En noir et gris sont représentés les résultats obtenus pour la purée de mangue en utilisant les cylindres coaxiaux et la géométrie à 6 ailettes, respectivement.	66
Figure 19 : Rheonaut HAAKE MARS 60 couplé à un spectromètre Nicolet iS50 FTIR de Thermofisher Scientific.	68

Figure 20 : Évolution de la force maximale nécessaire pour pénétrer de 15 mm les tranches de mangue ($F_{\max}$, N) en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall des lots 1 et 2.....	120
Figure 21 : Évolution du module de stockage G' (Pa) des tranches de mangue en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall des lots 1 et 2.	121
Figure 22 : Évolution de (a) l'acidité titrable, TA (g d'acide citrique / 100 g de purée), (b) la viscosité dynamique expérimentale μ à 50 s^{-1} (Pa.s) des purées (c) l'ESS ($^{\circ}\text{Bx}$) des purées des lots 1 et 2 en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall.	122
Figure 23 : Évolution de (a) du diamètre surfacique moyen $D [3 ; 2]$, (b) du module de stockage G' (Pa) des purées de mangues lots 1 et 2 en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall.	123
Figure 24 : Diagramme de Pareto standardisé pour le taux d'expansion.....	148
Figure 25 : Diagramme de Pareto standardisé pour la dureté.....	149
Figure 26 : Diagramme de Pareto standardisé pour ΔE	150
Figure 27: La superposition des graphiques de contours de tous les paramètres de réponse à une teneur en eau de 17,06 %.....	151

Liste des Figures dans les publications

Publication: *Impact of ripening on the physical properties of mango purees and application of simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy for rapid identification of biochemical and rheological changes*

Figure 1: Particle size distribution of three mango purees at different days of ripening (day 2, 14 and 25) and the range of the Sauter mean diameter $D [3;2]$ (μm) for different ripening stages.

Figure 2: Specific cohesion energy E_c (kPa) of puree SIS as a function of ripening (days).

Figure 3: Storage modulus G' and loss modulus G'' (Pa) of three mango purees at different days of ripening (day 2, 14 and 25) as a function of the frequency f (rad/s).

Figure 4: (a) A' and A'' in Pa.s^n the constants related to gel strength and (b) n' and n'' the relaxation exponents, obtained from the power law (Eq.3 and 4), as a function of ripening (days).

Figure 5: Storage modulus G' and loss modulus G'' (Pa) of three mango purees at different days of ripening (day 2, 14 and 25) as a function of the strain γ (%) and the range of the storage modulus G' (Pa) for different ripening stages.

Figure 6: *In situ* FTIR spectra ($4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$) of mango purees.

Figure 7: (a) Score plots of the two first principal components PC 1 and PC 2 of mango purees, (b) and (c) the loadings plots of PCAs components PC 1 and PC 2 respectively, using *in situ* FTIR spectra between 1200 and 960 cm^{-1} .

Publication: *Innovative non-destructive sorting technique for juicy stone fruits: textural properties of fresh mangos and purees*

Figure 1: Evolution of (a) D_{5N} (mm) and (b) $F_{\max}$ (N) during maturation.

Figure 2: Evolution of the storage modulus G' (Pa) of mango slices as function of (a) maturation (days), (b) $F_{\max}$ (N) and (c) D_{5N} (mm).

Figure 3: Evolution of (a) density, (b) and (c) L^* and a^* (color parameters) during maturation (days).

Figure 4: Particles size distributions of mango purees at 5 different days of maturation.

Figure 5: Effect of maturation on (a) $D_{[3;2]}$ (μm), (b) D_{10} (μm) and (c) D_{50} (μm).

Figure 6: Variation of the average surface diameter $D_{[3;2]}$ (μm) with (a) F_{max} (N), (b) D_{5N} (mm) and (c) G' of mango flesh (Pa).

Figure 7: Variation of the experimental dynamic viscosity μ at 50 s^{-1} (Pa. s) as function of the D_{5N} (mm).

Figure 8: Evolution of the storage modulus G' (Pa) as function of (a) the maturation (days) and (b) the D_{5N} (mm).

Figure 9: Variation of (a) the titratable acidity, TA (g citric acid / 100g puree) and (b) the total soluble solids, TSS ($^{\circ}\text{Bx}$) and dry matter, DM (g / 100g puree) during maturation.

Figure 10: Principal component analysis (PCA) on instrumental indicators of (a) mangos and (b) purees at different maturity stages. a*: red to green transition, b*: blue to yellow transition, DM: dry matter (g / 100 g puree), D_{5N} : distance of compression at 5N (mm), $D_{[3;2]}$: Sauter mean diameter (μm), $D_{[4,3]}$: Brouckere mean diameter (μm), D_{10} , D_{50} and D_{90} : particle size statistical diameters (μm), F_{max} : maximum value of the peak force (N), G' : storage modulus (Pa), G'' : loss modulus (Pa), K: consistency index (Pa.s^n), L^* : lightness (black to white transition), n: flow behavior index, TA: titratable acidity (g citric acid/ 100 g puree), TSS: total soluble solids ($^{\circ}\text{Bx}$).

Projet de Publication: *Physicochemical properties improving of dried mango cubes, using of a novel technology "Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum" (IVDV) combine with conventional hot-air drying*

Figure 1: (a) Flow chart of the experimental protocol. (b) Schematic diagram of the IVDV system: A: processing chamber; B vacuum tank; C: vacuum pump; D: Steam generator; E: ultra-speed pressure-increase system; a: ambient air injection valve; b: outlet valve; m: manometer; f: steam inlet valve; V: rapid decompression valve; cv: connection valve; nv: non return valve). (c) The pressure-time profile of the IVDV processing cycle; a: sample in the processing chamber at atmospheric pressure; b: decompression to vacuum in the processing chamber (~ 0.01 s); c: vacuum dwell for a few seconds; d: ultra-fast vapor pressure rise (with a $\Delta P/\Delta t$ greater than $12 \cdot 10^5 \text{ Pa/s}$) to reach the processing pressure P; e: processing time under high pressure and high temperature; f: release pressure to the vacuum (< 0.02 s); g: stay under vacuum for 2 to 3 s followed by an air shower for a few seconds; h: return to atmospheric pressure in the processing chamber and recovery of the product.

Figure 2: (a) Standardized Pareto chart of the expansion ratio with (i) the effect of the water content on the ER and (ii) the interaction water content / pressure; (b) the contours of estimated response surface of the expansion ratio; (c) Response surface plot of operating variables on the expansion ratio; (d) Standardized Pareto chart of the hardness with (i) the effect of the pressure on the hardness; (e) the contours of estimated response surface of the hardness; (f) Response surface plot of operating variables on the expansion ratio of IVDV expanded mango cubes.

Figure 3: Standardized Pareto chart for (a) the Work done, (b) the luminance L^* and (c) the total color change (ΔE).

Figure 4: The maximum compression force (F_{max} , N) required to shear (a) a treated mango cube with IVDV and (b) a hot-air dried mango cube as a function distance (mm) traveled by the probe.

Figure 5: The overlay plots of the outline superposition of (a) the expansion ratio and hardness response parameters at a water content of 17.8% and (b) all response parameters at a water content of 9.88%.

Figure 6: Photos of IVDV treated mango cubes according to the experimental plan.

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux du manuscrit

Tableau 1 : Caractéristiques des principales variétés de mangues (<i>Braz, 2004</i>)	15
Tableau 2 : Composition en pulpe, peau et noyau des principales variétés de mangues (Tommy Atkins, Kent, Keitt, et Haden).....	17
Tableau 3 : Composition chimique de la pulpe des principales variétés de mangues	18
Tableau 4 : Modèles mathématiques utilisés pour décrire les propriétés d'écoulement des suspensions de particules végétales.....	33
Tableau 5 : Relations utilisées pour calculer les grandeurs viscoélastiques dynamiques	34
Tableau 6 : Les paramètres de traitement et les plages de variation de pression de vapeur saturante (P), la teneur en eau initiale (W) et le temps de traitement (t).	74
Tableau 7 : Le plan composite centré avec les combinaisons de variables indépendantes : la vapeur saturante (P), la teneur en eau initiale (W) et le temps de traitement (t).	74
Tableau 8 : Valeurs optimales des paramètres réponses résultant de l'optimisation simple et multiple	151
Tableau 10 : Analyse de la variance pour les valeurs de la force max (F_{max}) lors de l'utilisation de la sonde « lame de couteau artisanal »	162
Tableau 11 : Analyse de la variance pour l'aire sous le pic représentant l'énergie (WD) lors de l'utilisation de sonde la « lame de couteau artisanal »	162
Tableau 12 : Analyse de la variance pour les valeurs de la force max (F_{max}) lors de l'utilisation de la sonde « sphérique »	162
Tableau 13 : Analyse de la variance pour l'aire sous le pic représentant l'énergie (WD) lors de l'utilisation de sonde « sphérique »	162
Tableau 14 : Le plan composite centré avec les combinaisons de variables indépendantes : la vapeur saturante (P), la teneur en eau initiale (W) et le temps de traitement (t) et les paramètres réponses : taux d'expansion (ER), dureté (HARD) et la distance entre deux couleurs (ΔE) des cubes de mangue mûres traités par IVDV.	164

Liste des Tableaux dans les publications

Publication: *Impact of ripening on the physical properties of mango purees and application of simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy for rapid identification of biochemical and rheological changes*

-

Publication: *Innovative non-destructive sorting technique for juicy stone fruits: textural properties of fresh mangos and purees*

Table 1: The ranges of variation of K, the consistency index (Pa.sⁿ), n, the flow behavior index and μ (Pa.s) the experimental dynamic viscosity at 50 s⁻¹ of mango purees.

Projet de Publication: *Physicochemical properties improving of dried mango cubes, using of a novel technology "Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum" (IVDV) combine with conventional hot-air drying*

Table 1: Response parameters values of the expanded mango cubes differently treated by IVDV based on the Central Composite design.

Table 2: Optimum values of responses parameters resulting from separate and multiple optimizations.

Nomenclature

Nomenclature

a_w	Activité de l'eau
A'	Constante de la loi de puissance reflétant les propriétés élastiques (Pa.s ⁿ)
A''	Constante de la loi de puissance reflétant les propriétés visqueuses (Pa.s ⁿ)
AT	Acidité titrable (g d'acide citrique/100g de purée)
ATR	Réflectance totale atténuée
CIELAB	Commission internationale de l'éclairage, abrégé CIE pour son nom français
D_{5N}	Distance de compression à 5N (mm)
D_{10N}	Distance de compression à 10N (mm)
D_{10}	Taille de particules pour laquelle 10 % des particules ont une taille inférieure à ce diamètre (m)
D_{50}	Taille des particules pour lesquelles 50% des particules ont une taille inférieure à ce diamètre (m)
D_{90}	Taille des particules pour lesquelles 90% des particules ont une taille inférieure à ce diamètre (m)
$D[3 ; 2]$	Diamètre moyen en surface ou diamètre moyen de Sauter : le diamètre d'une sphère qui a le même rapport volume/surface que l'ensemble des particules (m)
$D[4 ; 3]$	$D[4;3]$, diamètre moyen en volume ou diamètre moyen de Brouckere : le diamètre d'une sphère dont le volume est égal aux volumes moyens de toutes les particules de l'échantillon (m)
DIC	Détente instantanée contrôlée
E_c	Énergie spécifique de cohésion (Pa ou J.m ³)
ESS	Extrait sec solubles (°Bx)
f	Fréquence (rad/s)
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
F_{max}	Valeur maximale de la force (N)
FTIR	Spectroscopie infra-rouge à transformée de Fourier
g	Accélération de la pesanteur (m.s ²)
G'	Module de stockage (Pa)
G''	Module de perte (Pa)
Hz	Hertz
HR	Humidité relative (%)
IR	Infra-rouge
IVDV	Intensification de vaporisation par détente vers le vide
K	Indice de consistance (Pa.s ⁿ)
L	Litre
n	Indice de comportement d'écoulement
n'	Exposant de relaxation de la loi de puissance fournissant des informations sur la dépendance en fréquence de G'
n''	Exposant de relaxation de la loi de puissance fournissant des informations sur la dépendance en fréquence de G''
P	Pression de vapeur saturante (MPa)
PCA	Analyse en composantes principales
PC	Composante principale
PEL	Pectate lyase

PG	Polygalacturonase
pH	Potentiel hydrogène
PME	Pectine méthylestérase
ppm	Parties par million
PPO	Polyphénol oxydase
RPM	Révolutions par minute
SIS	Solides insolubles en suspension (g/100g)
SNV	<i>Standard Normal Variate</i>
T	Température (°C)
W	Teneur en eau (%)
t	Temps (s)
τ	Contrainte de cisaillement (Pa)
τ_0	Seuil d'écoulement (Pa)
γ_c	Déformation critique de cisaillement (%)
μ_a	Viscosité apparente (Pa.s)
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement (s ⁻¹)
η_{pl}	Viscosité plastique de Bingham (Pa.s)
δ	Angle de déphasage

Table des matières

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract	iv
Liste des Figures.....	ix
Liste des Figures du manuscrit.....	ix
Liste des Figures dans les publications	x
Liste des Tableaux.....	xii
Liste des Tableaux du manuscrit.....	xii
Liste des Tableaux dans les publications.....	xii
Nomenclature	xiv
Table des matières	xvii
Introduction générale.....	4
CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART.....	9
1. La mangue : un fruit tropical	9
1.1. Taxonomie et origine botanique.....	9
1.2. Cycle de croissance	11
1.3. Maturation et mûrissement de la mangue : Fruit climactérique	12
1.4. Production et exportation mondiale.....	14
1.5. Consommation et valorisation.....	16
1.6. La mangue en Afrique de l'Ouest : Production, transformation et consommation	16
1.7. Composition nutritionnelle de la mangue.....	17
1.8. Les pertes post-récolte de la mangue.....	20
1.9. La transformation de la mangue	20
Les mangues de 4 ^{ème} gamme	20
Les mangues séchées.....	21
Les purées de mangues.....	21
La confiture de mangues	22
Les jus de mangues.....	22
Le nectar de mangues.....	22
Le vin et l'alcool de mangues.....	22
1.10. Le suivi de la qualité des fruits : mesures physiques et physico-chimiques conventionnelles et innovantes	23
1.10.1 Caractéristiques et propriétés conventionnellement mesurées	24
La fermeté	24
La couleur de la pulpe et de la peau	24
L'acidité titrable (AT)	24
Le degré Brix (°Bx) ou extrait sec soluble (ESS).....	25
1.10.2 Outils de caractérisation innovants.....	25
c) Mesures acoustiques.....	27

2.	Les purées de fruits.....	27
2.1.	Spécificités des purées de fruits	27
2.1.1	Préambule : cellules et parois végétales	27
2.1.2	Définition et structure des purées de fruits	30
2.2.	Les comportements rhéologiques des purées de fruits	31
2.2.1	Propriétés d'écoulement	32
2.2.2	Mesure des propriétés viscoélastiques : Méthodes opératoires et modules.....	33
	Méthodes opératoires d'évaluation d'un comportement viscoélastique.....	33
	Géométrie des modules	34
2.2.3	Les paramètres affectant les propriétés rhéologiques des purées de fruits	36
a)	Les facteurs intrinsèques	36
b)	Les facteurs extrinsèques.....	36
3.	Les produits séchés.....	38
3.1.	Le séchage de produits alimentaires.....	38
3.2.	Technologies du séchage.....	38
3.2.1	Les méthodes conventionnelles.....	39
a)	Le séchage convectif par air chaud	39
b)	Le séchage par conduction	43
c)	L'atomisation.....	44
d)	La lyophilisation.....	44
3.2.2	Les méthodes innovantes.....	45
3.3.	La technique de texturation par Intensification de la Vaporisation par Détente vers le Vide (IVDV).....	47
3.3.1	L'équipement IVDV	47
3.3.2	Le processus d'expansion par IVDV	48
3.3.3	Cinétique de séchage suite à un traitement par IVDV	50
3.3.4	Les avantages de l'IVDV	51
3.3.5	Les applications de l'IVDV	52
CHAPITRE 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....		54
1.	Première partie : <i>Les purées de mangues</i>	54
1.1.	Matière première	54
1.2.	Caractérisation des mangues	55
1.2.1	Densité.....	55
1.2.2	Caractérisation texturale.....	55
	Texture non – destructive par compression.....	56
	Texture destructive par pénétrométrie.....	57
1.2.3	Caractérisation rhéologique des tranches de mangues	58
1.3.	Transformation des mangues en purée	59
1.4.	Caractérisation des purées	59
1.4.1	Analyses physico-chimiques conventionnelles	59
	Acidité titrable et pH	59

L'extrait sec soluble	60
La matière sèche totale	60
La couleur	60
1.4.2 Caractérisation des solides insolubles en suspension	61
1.4.3 Distribution en taille de particules des purées et de leurs solides insolubles en suspension	62
1.4.4 Caractérisation rhéologique conventionnelle des purées.....	64
Choix de la géométrie, du pré-cisaillement et du temps de repos	64
Mesures en mode écoulement	66
Mesures en mode dynamique : Balayage oscillatoire de fréquence	66
1.4.5 Caractérisation des purées par rhéométrie couplée à la spectroscopie en moyen infra-rouge	67
Caractérisation rhéologique.....	68
Caractérisation spectrale en moyen infra-rouge	68
2. Deuxième partie : <i>Les mangues séchées expansées</i>	69
2.1. Matière première	69
2.2. Le séchage par air-chaud	70
2.3. L'équipement IVDV et le processus d'expansion	71
2.4. Caractérisation physico-chimique des cubes de mangues séchés et expansés	71
2.4.1 Le taux d'expansion	71
2.4.2 La texture.....	72
2.4.3 Couleur	72
2.5. Optimisation par la méthodologie de surface de réponse.....	73
2.5.1 Le plan d'expérience	73
2.5.2 Modélisation mathématique	75
2.5.3 Les analyses statistiques	75
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	77
1. Caractérisation des mangues fraîches et des purées de mangues au cours de la maturation : outils de prédiction des propriétés des purées.....	77
1.1. Préambule.....	77
1.2. Évaluation des changements physiques et biochimiques des purées au cours de la maturation des mangues et mise en place d'un outil rapide pour la prédiction de ces changements	79
1.2.1 Impact of ripening on the physical properties of mango purees and application of simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy for rapid identification of biochemical and rheological changes.	79
Introduction	80
Materials and methods.....	81
Results and discussion.....	85
Conclusion.....	94
1.2.2 Bilan de l'étude	95

Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées

1.3.	Développement et mise en place d'un test non-destructif pour le suivi de la maturation de la mangue et pour l'anticipation des propriétés physiques et physico-chimiques des purées	96
1.3.1	Innovative non-destructive sorting technique for juicy stone fruits: textural properties of fresh mangos and purees.	96
	Introduction	97
	Materials and methods.....	98
	Results and discussion.....	103
	Conclusion.....	116
1.4.	Conclusion globale et validation des stratégies expérimentales proposées	118
1.4.1	Caractérisation des mangues fraîches.....	119
1.4.2	Caractérisation des purées	121
1.4.3	Conclusion.....	123
2.	Valorisation des mangues : <i>Application du procédé de texturation « Intensification de vaporisation par détente vers le vide, IVDV » pour une amélioration de la texture et de la couleur des mangues séchées.</i>	124
2.1.	Préambule.....	124
2.2.	Vers une valorisation des mangues par un nouveau procédé de texturation : <i>Utilisation de l'Intensification de Vaporisation par Détente vers le Vide, IVDV</i>	125
2.2.1	Physicochemical properties improving of dried mango cubes, using of a novel technology "Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum" (IVDV) combine with conventional hot-air drying	126
	Introduction	128
	Materials and methods.....	130
	Results and discussion.....	135
	Conclusion.....	146
2.3.	Application de l'IVDV sur un lot de mangues mûres	147
2.3.1	Effets des variables indépendantes sur les paramètres de réponse	148
2.3.2	Conclusion.....	151
	Conclusions et perspectives.....	154
	ANNEXE 1 : <i>Détermination des jours de maturation des mangues utilisées pour la réalisation campagne de mesure : Séchage et texturation</i>	159
	ANNEXE 2 : <i>Analyse statistique (ANOVA) : Choix de la sonde utilisée lors des mesures de texture (campagne de mesure : Séchage et texturation).</i>	162
	ANNEXE 3 : <i>Matrice du plan d'expérience et résultats obtenus pour les mangues provenant du stade de maturation avancé</i>	164
	Références Bibliographiques.....	167

Introduction Générale

Les travaux de cette thèse, s'inscrivent le cadre du projet INTERFACES (co-porté par le CIRAD et l'INRAE, et financé par la Fondation Agropolis). Les activités de recherche se sont déroulées sur la Plate-forme Agro-Alimentaire du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Cirad) et dans le Centre d'analyses et de Recherches de la Faculté des Sciences de l'Université Saint-Joseph de Beyrouth (CAR - USJ - FS) dans le cadre d'un contrat doctoral en cotutelle entre l'Université de Montpellier (École doctorale GAIA, champ disciplinaire APAB (Agroressources, Procédés, Aliments, Produits)) et l'Université Saint-Joseph de Beyrouth (École Doctorale de Sciences, d'Ingénierie et de Technologie EDSIT).

**« Les interfaces entre la production et la transformation des fruits sont considérées
comme des points clés pour la durabilité de la chaîne alimentaire »**

Projet INTERFACES 2017 – 2020

Le projet INTERFACES, structuré en 6 tâches, a pour objectif général de faire face à la diversité et à l'hétérogénéité des matières premières agricoles et d'optimiser leur transformation pour des systèmes alimentaires plus durables.

Dans ce projet, qui vise à comprendre quels sont les facteurs qui, en influençant les caractéristiques des fruits frais, permettent de moduler les caractéristiques des fruits transformés, trois combinaisons de fruits et produits transformés ont été considérées : **la pomme/compote, le raisin/vin et la mangue/purée et mangue séchée.**

Ces travaux de thèse s'intègrent dans la tâche 1 du projet « *Indicateurs et méthodes pour caractériser la variabilité et l'hétérogénéité* ». En effet, pour mieux valoriser l'hétérogénéité des matières premières, il apparaît indispensable d'identifier des indicateurs et de mettre en place des méthodes, pour mieux caractériser d'une part l'hétérogénéité qui se crée au champ et au cours du mûrissement des fruits et d'autre part la capacité des fruits à être transformés en fonction des conditions de mûrissement.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche dans lequel la mangue et deux produits transformés de la mangue (purées et mangues séchées expansées) ont été étudiés.

Introduction générale

La mangue, *Mangifera indica* L., est un fruit tropical originaire de la région indo-birmane, occupant le cinquième rang de la production fruitière mondiale après les agrumes, le raisin, la banane et la pomme (FAO, 2020; Paull and Duarte, 2011). Il existe environ un millier de variétés cultivées à travers le monde qui diffèrent par la taille, la couleur, la texture et les propriétés nutritionnelles du fruit (Djioua et al., 2010). Cette diversité variétale en fait un des fruits les plus populaires dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales. La mangue est également appréciée pour son goût sucré et pour sa richesse vitaminique, surtout en vitamines A et C et en minéraux tels que le calcium, le potassium, le phosphore et le fer (Maldonado-Celis et al., 2019).

La mangue est caractérisée par une production saisonnière ; elle est ainsi largement abondante en certaines périodes de l'année, conduisant à d'énormes pertes post-récolte pouvant atteindre 40% pour certains pays de l'Afrique de l'Ouest (Arnoldus et al., 2011). La valorisation des variétés "de bouche", destinées à la consommation locale ou à l'exportation, ne s'avère pas suffisante pour éviter ces pertes. Pour cela, transformer la mangue en purée ou en produit séché constitue une alternative permettant de limiter les pertes post-récolte, de valoriser le surplus de production et de générer des sources de revenus locaux. En effet, la demande, pour les marchés européens ou nord-américains, en mangue séchée ou en purée de mangue, est très forte et constitue un réel débouché de valorisation de ce fruit tropical (Arnoldus et al., 2011).

La construction d'un système agro-alimentaire durable pour cette alternative doit intégrer dans un environnement complexe, les aspects agronomiques, logistiques post-récolte, de transformation et de marché. Dans cette construction, les interfaces entre la production du fruit et sa transformation constituent des points clés de cette durabilité. En effet, il est nécessaire d'optimiser, sur la base de critères objectifs, le choix de la matière première pour répondre aux attentes des transformateurs et des consommateurs. De nouveaux indicateurs, basés sur des outils et des méthodes de mesures instrumentales, restent à concevoir. Les expériences passées, notamment celles accompagnées par les équipes du Cirad, ont confirmé que l'hétérogénéité de la matière première constitue un verrou pour la maîtrise de la conduite des procédés de transformation et de la qualité du produit fini (Arnoldus et al., 2011). Actuellement, la sélection des fruits aptes à être transformés repose sur le savoir-faire des opératrices (Rivier et al., 2009). Ce savoir-faire, basé sur une reconnaissance visuelle et tactile des stades de maturité, reste néanmoins subjectif et peu reproductible, compte-tenu de l'hétérogénéité de la maturité

rencontrée dans un même lot de mangues destinées à la transformation. En effet, la position des fruits sur l'arbre (fruits ombragés / ensoleillés), la charge en fruits, la température au champ, les stress hydriques peuvent affecter l'évolution de la maturation des fruits (Joas et al., 2009; Léchaudel and Joas, 2007; Nordey, 2014). De plus, à ce jour, les indicateurs développés ou en cours de développement (densité, fluorescence, NIRS) restent essentiellement orientés vers le marché de la mangue de bouche (Lechaudel et al., 2010; Nordey et al., 2017) et pourraient *a priori* être différents pour les mangues dédiées à la transformation. Ainsi, la compréhension des critères de choix des mangues avant transformation ainsi que leur objectivation en indicateurs s'avèrent être un point clé pour l'optimisation et la maîtrise de la qualité des produits transformés.

L'étude présentée dans ce manuscrit se propose de répondre principalement à la question de recherche suivante : quels sont les indicateurs de qualité mesurés sur la mangue fraîche qui permettent d'une part de prédire la qualité de la mangue transformée (purée) et d'autre part de choisir l'itinéraire de transformation le plus adapté (séchée expansée) ?

Ce travail de recherche se décline en 2 grandes parties axées sur deux types de produits de mangues transformées : ***les purées de mangues et les mangues séchées expansées***.

Concernant les purées de mangues, 3 objectifs ont été ciblés :

- Étudier l'impact du mûrissement sur les propriétés physiques et biochimiques des mangues et des purées,
- Identifier les relations entre les propriétés des mangues fraîches et celles des purées pour choisir des indicateurs pertinents permettant de prédire les propriétés des purées,
- Prédire ces indicateurs à l'aide d'un test simple, rapide et non-destructif qui pourra être utilisé comme outil de tri des mangues fraîches dans des unités de transformation des mangues dans les pays du Sud.

Concernant les mangues séchées, le travail a également été motivé par 3 objectifs :

- Proposer une nouvelle voie de valorisation de la mangue sous forme de chips croustillant,
- Caractériser les produits séchés (taux d'expansion, texture et couleur) pour optimiser les conditions opératoires d'un nouveau procédé de texturation, l'IVDV (*Intensification de la Vaporisation par Détente vers le Vide*), notamment pour des mangues provenant d'un stade avancé de mûrissement, principale source des pertes post-récolte (courte durée de vie et défauts organoleptiques),

- Valider et mettre au point le nouveau procédé de texturation permettant de corriger certains défauts de qualité du produit séché et proposer ainsi un nouveau produit transformé de la mangue mûre.

Le manuscrit de thèse proposée est organisé en 3 chapitres.

Le **premier chapitre** concerne l'étude bibliographique et comporte trois grandes parties. La première partie présente un état des connaissances sur la mangue (taxonomie, cycle de croissance, maturation, production, consommation...) et une synthèse bibliographique sur les méthodologies actuellement utilisées pour l'évaluation des propriétés physiques et physico-chimiques des fruits. La deuxième partie présente un état de l'art sur les propriétés des suspensions de particules végétales, leurs constituants et leurs structures, ainsi qu'une synthèse des connaissances actuelles sur les paramètres ayant une influence sur les propriétés rhéologiques des suspensions à base de fruits. La troisième partie décrit non seulement les procédés de séchage (conventionnels et innovants) mais également les nouveaux procédés de texturation utilisés pour l'amélioration des qualités organoleptiques des produits séchés en détaillant un nouveau procédé de texturation basé sur une intensification de vaporisation par détente vers le vide, et ainsi intitulé IVDV ».

Le **second chapitre** donne un aperçu du matériel et des méthodes ainsi que des outils, des analyses, et des procédés mis en œuvre dans ce travail.

Le **troisième chapitre** présente les résultats obtenus d'une part sur les purées de mangues et d'autre part sur les mangues séchées expansées. Dans la première partie de ce chapitre, il est question d'évaluer l'effet du mûrissement sur les propriétés physiques des purées de mangues. Une démarche scientifique, couplant des mesures rhéologiques et spectrales pour le suivi des évolutions physiques et biochimiques des mangues et de leur purée en lien avec le mûrissement, est présentée. Une stratégie expérimentale, permettant de proposer un outil non-destructif pour trier les mangues en fonction de leur maturité et des propriétés des purées, est ensuite développée. Deux publications alimentent la première partie de ce chapitre. La seconde partie de ce chapitre concerne l'étude d'un nouveau procédé de texturation (IVDV) qui vise à une amélioration de la texture et de la couleur des produits séchés provenant principalement de mangues à des stades de mûrissement avancé. Les résultats sont également présentés ici sous forme d'article.

Pour clôturer le document, une conclusion reprendra les principales avancées du travail et les perspectives qui en découlent.

Chapitre 1. État de l'Art

CHAPITRE 1. ÉTAT DE L'ART

1. La mangue : un fruit tropical

1.1. Taxonomie et origine botanique

Le manguier est un arbre fruitier de climat tropical et subtropical appartenant à la famille des *Anacardiaceae*. Cet arbre, originaire de la région indo-birmane, peut atteindre plus de 30 mètres de haut (Paull and Duarte, 2011). Il existe 69 espèces appartenant au genre *Mangifera*, dont *Mangifera indica*, l'espèce la plus cultivée. La figure 1, résume la classification du manguier *Mangifera indica* (K. Shah et al., 2010). Cette espèce comprend des centaines de variétés aussi appelées cultivars (Paull and Duarte, 2011; Rivier et al., 2009) qui se distinguent par le cycle de vie de l'arbre, la morphologie (taille, feuilles, floraison, etc.) mais aussi par les fruits produits (quantité, goût, taille, couleur, composition physico-chimique, qualités nutritionnelles, résistance aux transports, au stockage, aux maladies, aux insectes, etc.). Les températures optimales pour le développement et pour la floraison du manguier, ainsi que pour la croissance et la maturation des mangues, varient entre 25 et 33°C (Paull and Duarte, 2011).

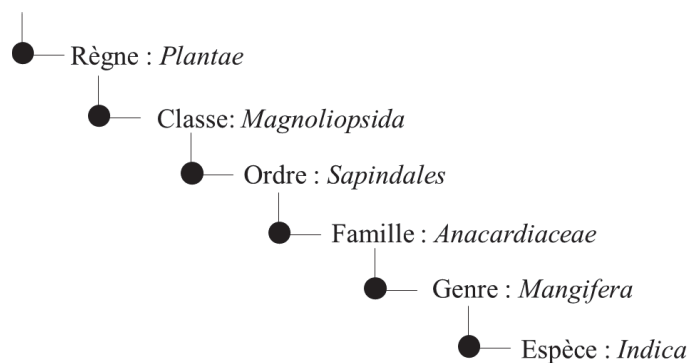


Figure 1. Classification du manguier de l'espèce *Indica* (K. Shah et al., 2010).

Vu l'intérêt culinaire des mangues, le manguier a été domestiqué (définition de la domestication cf. Encadré 1), il y a environ 4 000 ans. L'Inde est le centre de domestication des mangues à graines monoembryonnaires, produisant une seule plante, alors que l'Asie du Sud (Indonésie, Philippines et Thaïlande) est le centre de domestication des mangues à graines polyembryonnaires, produisant plusieurs plantes identiques mais pas toujours semblables au parent (Tharanathan et al., 2006).

Les variétés monoembryonnaires sont des variétés moins viables que les variétés polyembryonnaires en raison de leur sensibilité aux maladies, plus spécifiquement à la maladie fongique la plus importante des manguiers : l'anthracnose (FruiTrop, 2018; N'Guettia, 2015). Le fruit issu du manguier, la mangue, est une drupe pouvant présenter des caractéristiques différentes en terme de taille, de couleur, de forme, de saveur et de goût (Berardini et al., 2005; Paull and Duarte, 2011). Ce fruit charnu, dont le poids varie de quelques dizaines de grammes, à plus de 1 kg, est constitué d'un exocarpe, d'un mésocarpe et d'un endocarpe (Paull and Duarte, 2011; Tharanathan et al., 2006). La figure 2 présente l'anatomie de la mangue. L'exocarpe est une peau protectrice, lisse, verte et cireuse qui, à maturité, vire vers un vert pâle ou un jaune-orange voire parfois rouge, selon les variétés. La partie comestible du fruit, le mésocarpe, est une pulpe charnue qui varie en termes d'épaisseur (2,5 à plus de 3 cm), de fermeté, de teneur en jus, de saveurs, d'arômes, de couleurs et de présence de fibres. Sa couleur dépend largement de plusieurs composés biochimiques tels que la chlorophylle, les carotènes, les anthocyanes et les xanthophylles, dont les teneurs évoluent durant la maturation. Il s'agit plus précisément de la disparition de la chlorophylle et de l'augmentation de la concentration des anthocyanes et des caroténoïdes (Bonneau, 2018; Tharanathan et al., 2006). Le mésocarpe possède une cavité dans laquelle se trouve l'endocarpe : un grand noyau dur contenant une graine entourée de fibres (Djantou Njantou Elie Baudelaire, 2006; Paull and Duarte, 2011). Les graines peuvent être ovoïdes, allongées ou aplaties, pierreuses, dures, etc. (Tharanathan et al., 2006)

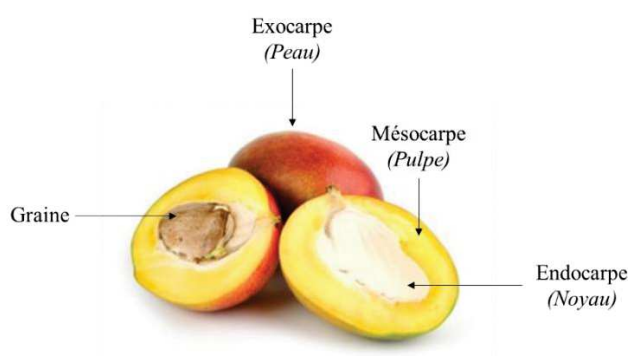


Figure 2 : Anatomie de la mangue avec l'exocarpe, le mésocarpe et l'endocarpe.

Encadré 1 : La domestication

La domestication d'une plante, est l'acquisition ou la perte de caractères morphologiques, physiologiques voire même le développement de nouveaux caractères, résultant d'un contrôle et d'une sélection artificielle, assurés par les hommes. Elle consiste principalement en une modification du patrimoine génétique de l'espèce végétale.

Plus simplement, la domestication des plantes est la transformation de certains caractères sauvages pour une meilleure utilisation et consommation humaine.

La domestication a pour but d'améliorer de façon quantitative et qualitative, les productions végétales. En effet, elle permet **une augmentation du rendement, une résistance aux mauvaises conditions climatiques, aux maladies et aux insectes ainsi qu'une amélioration de la qualité intrinsèque de certaines plantes destinées à une utilisation non alimentaire (pharmaceutique, textile, carburant)** (Gepts, 2014).

1.2. Cycle de croissance

Quatre différentes étapes constituent la croissance du fruit de la mangue (Léchaudel M., 2004; Tharanathan et al., 2006), figure 3:

1. Le *stade juvénile* est le premier stade du développement qui conduit à une croissance cellulaire rapide,
2. Le *stade de croissance* qui entraîne l'accroissement et la maturation des cellules,
3. Le *stade de maturation et maturité* (différence entre maturité, maturation et mûrissement cf. Encadré 2), est le stade de respiration climactérique, c'est-à-dire, quand le fruit initie sa maturation et acquiert sa maturité (fruit vert mature mais non mûr) pour ensuite subir le mûrissement (passage d'un fruit vert mature à un fruit mûr). En effet, la mangue est un fruit climactérique caractérisé par une grande production d'éthylène, hormone végétale, déclenchée sur l'arbre et/ou après récolte. Durant cette période le fruit produit fortement de l'éthylène provoquant de nombreuses modifications biochimiques qui induisent un changement de couleur (dégradation de la chlorophylle et augmentation des anthocyanes et des caroténoïdes), de goût (diminution de l'acidité, hydrolyse de l'amidon en sucres simples, etc.), un développement d'arômes et enfin une diminution de la fermeté (hydrolyse des pectines) (Nordey, 2014).
4. Le *stade de sénescence* est le stade où le fruit atteint sa maturité optimale pour être consommé. Vers la fin de ce stade, le fruit débute sa détérioration (attaque microbienne, dégradation enzymatique, fermentation, etc.).

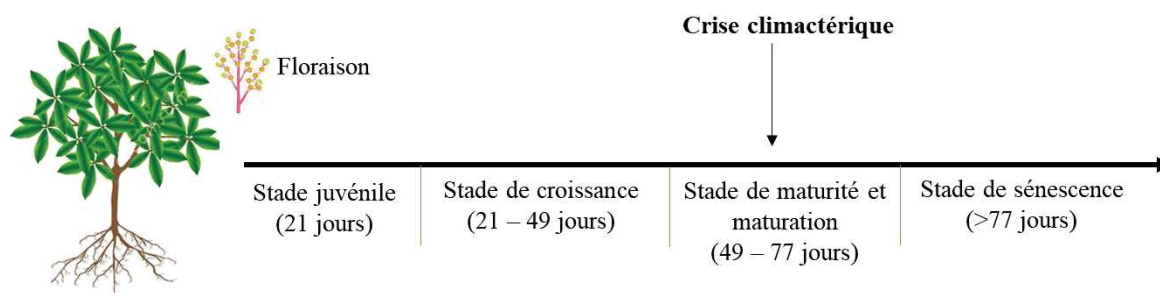


Figure 3. Le cycle de croissance de la mangue (Tharanathan et al., 2006).

Encadré 2 : Différence entre maturité, maturation et mûrissement

Le mûrissement, la maturation et la maturité sont, trois termes relatifs au développement d'un organisme, d'un être ou d'un fruit.

La maturation ou mûrissement sont les processus de croissance et d'évolution grâce auquel le fruit parvient à maturité.

La maturité désigne ce qui est mûr. Un fruit mûr est ainsi arrivé à maturité.

Les termes mûrissement et maturation peuvent tous deux être utilisés pour indiquer le processus de croissance que subit le fruit pour devenir mûr.

Dans ce travail, nous avons adopté le terme **maturation** (*maturation en anglais*) pour indiquer le phénomène de développement que subit le fruit sur l'arbre, le rendant prêt à être récolté mais pas nécessairement à être consommée immédiatement. Et le terme **mûrissement** (*ripening en anglais*) pour indiquer le développement que subit le fruit après sa récolte dans des conditions contrôlées, le rendant comestible ou adéquat à la transformation.

Le terme affinage peut signifier aussi mûrissement.

1.3. Maturation et mûrissement de la mangue : Fruit climactérique

L'activité respiratoire ainsi que la production d'éthylène permet généralement de classer les fruits en climactériques et non climactériques. Tout comme d'autres fruits (l'avocat, la banane, l'abricot, le kiwi, etc.), la mangue est un fruit climactérique aussi appelé « fruit dépendant de l'éthylène » (Nordey, 2014; Pathak et al., 2018; Tharanathan et al., 2006). Ces fruits se caractérisent par leur capacité à subir la maturation sur l'arbre et un mûrissement après récolte. Ainsi, les fruits climactériques tels que la mangue, peuvent être récoltés à un stade de

développement appelé stade vert mature (non mûr) et poursuivre leur mûrissement après cueillette.

Sur l'arbre, la production d'éthylène commence à augmenter considérablement dès le début du stade de maturité et maturation (49 jours après la floraison : cf. point 3 du § 1,2) jusqu'à atteindre la crise climactérique. Suite à cette crise, la production d'éthylène diminue lentement avant que le fruit entre dans le stade de senescence (Fuentes et al., 2019).

Après récolte, la production d'éthylène et les caractéristiques respiratoires, déclenchant le mûrissement des mangues, dépendent de plusieurs facteurs tels que la maturité à la récolte, la température de stockage, l'humidité, etc. (Barboza et al., 2016).

Au cours du mûrissement, un ramollissement de la texture ainsi que des modifications de la composition de la mangue, sont observés.

Le ramollissement des fruits est principalement dû à l'activité des enzymes pectolytiques telles que la polygalacturonase (PG), la pectine méthyle estérase (PME), la pectate lyase (PEL) et la galactosidase, impliquées dans l'hydrolyse des pectines (diminution du poids moléculaire des pectines) présentes dans les parois cellulaires (Barboza et al., 2016; Bello-Pérez et al., 2007; Maldonado-Celis et al., 2019; Payasi and Sanwal, 2010; Yahia, 2011; Yashoda et al., 2006).

À l'égard de la composition de fruit, l'amidon, le polymère le plus important en terme de concentration dans le fruit vert, est hydrolysé en sucres simples tels que les monosaccharides (glucose et fructose) et les disaccharides (saccharose) au cours de la maturation (Bello-Pérez et al., 2007; Maldonado-Celis et al., 2019; Payasi and Sanwal, 2010). De plus, la teneur en acides organiques di- et tricarboxyliques (malique, citrique, pyruvique, oxalique, tartrique et succinique : les acides organiques majoritaires dans la mangue) diminue significativement au cours du mûrissement. La diminution de l'acidité et l'accumulation des sucres sont responsables du développement de la saveur et de goût du fruit mûr.

D'autres composés, tels que les vitamines, subissent aussi des évolutions au cours de la maturation et du mûrissement. Par exemple, la teneur en vitamine C, l'un des principaux nutriments de la mangue, diminue considérablement suite à une destruction oxydative (Barboza et al., 2016; Yahia, 2011). À la fin de l'affinage, le fruit est riche en provitamine A et en vitamine B1 (la thiamine) ainsi qu'en vitamine B2 (la riboflavine).

Enfin, un changement de la couleur est également observé au cours de la maturation et de l'affinage. Il est causé par la dégradation de la chlorophylle et par la synthèse et/ou l'accumulation de différents pigments, principalement les anthocyanines et les caroténoïdes (Yashoda et al., 2006).

1.4. Production et exportation mondiale

La production mondiale de la mangue est en augmentation continue. Elle a été estimée à 55 millions de tonnes métriques de fruits en 2020, figure 4 (F. and A. O. of U. N. FAO, 2019), la plaçant au deuxième rang dans la production des fruits tropicaux dans le monde, après la banane.

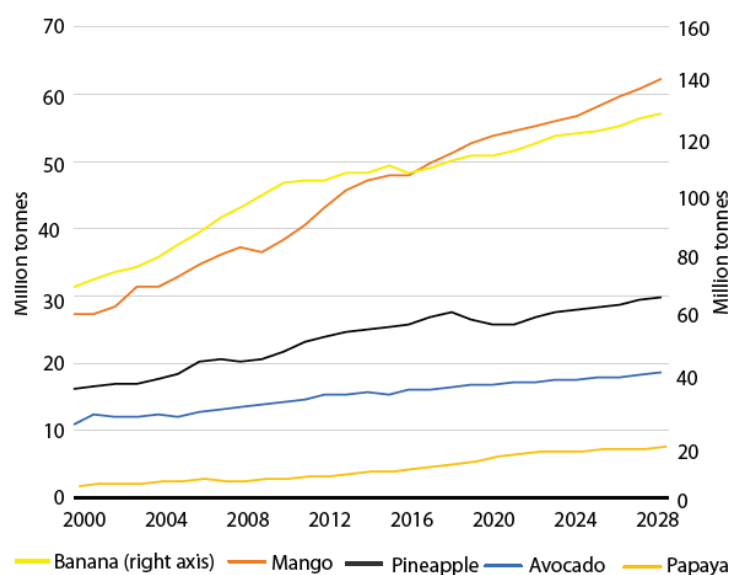


Figure 4 : Évolution et prédiction (2000-2028) de la production mondiale de la mangue et d'autres fruits tropicaux (F. and A. O. of U. N. FAO, 2019).

Les principaux producteurs de mangues sont l'Inde, la Chine, la Thaïlande, l'Indonésie, les Philippines, le Mexique, le Pérou et le Pakistan. 77 % de la production proviennent des pays asiatiques, 14% de l'Amérique et 9% de l'Afrique (Lo'ay et al., 2005). Selon la FAO, l'Inde a concentré à elle seule, en 2020, près de la moitié (40 %) de la production mondiale suivie par la Chine (11 %), le Pakistan (7 %) et le Mexique (6 %) (FAO, 2020).

Bien que la plus grande production de mangues provienne des pays Asiatiques, seuls 26 % de leur production sont exportés. En effet, les deux principaux marchés d'importation sont les États-Unis et l'Europe avec une importation provenant principalement du Mexique pour les États-Unis et du Brésil et du Pérou pour le marché Européen (Evans, 2008). Même si le Brésil et le Pérou représentent les leaders d'exportation vers le marché européen, le Mali, la Côte d'Ivoire, le Pakistan, l'Israël, le Sénégal, le Burkina Faso, le Mexique et d'autres pays

constituent aussi des centres d'exportation en raison du caractère saisonnier et de la demande élevée de mangues en Europe.

Il existe plusieurs variétés de mangues, on peut nommer la Tommy Atkins, la Kent, la Keitt, la Palmer, l'Amélie, la Valencia Pride, l'Haden, l'Irwin, l'Osteen, la Maya, l'Omer, l'Alfonso, etc. (Evans et al., 2017; United Nations, 2016).

Les quatre principales variétés commercialisées dans le monde sont la Tommy Atkins, la Haden, la Keitt et la Kent (Figure 5). Le tableau 1 présente les caractéristiques des principales variétés de mangues. Ces variétés sont les plus rencontrées et vendues en Europe avec la Haden, la plus onéreuse, suivie par la Kent, la Keitt et enfin la Tommy Atkins (Evans et al., 2017). Les mangues sont commercialisées une grande partie de l'année sur les marchés européens. Les variétés retrouvées dépendent de la saison, des distributeurs, de l'origine géographique et du mode de transport (avion ou bateau).

Tableau 1 : Caractéristiques des principales variétés de mangues (Braz, 2004).

Variétés	Forme du fruit	Calibre	Couleur de la peau	Caractéristiques de la pulpe
Tommy Atkins	Ovoïde / légèrement oblong	450 - 710 g	Orange jaune et rouge	Orangé foncé, juteuse, légèrement fibreuse
Kent	Ovoïde gros	450 - 750 g	Jaune verdâtre et rouge foncé	Jaune intense à jaune orange, juteuse, sans fibres
Keitt	Ovale	450 - 680 g	Jaune-orange et légèrement rouge	Orange à jaune foncé, ferme, juteuse, fruitée, fibreuse
Haden	Ovale	340 - 560 g	Jaune et rouge foncé	Jaune orange, juteuse, légèrement acidulée



Tommy Atkins



Kent



Haden



Keitt

Figure 5 : Les principales variétés de mangues retrouvées sur le marché européen (Evans et al., 2017).

1.5. Consommation et valorisation

La commercialisation de la mangue et de ses coproduits s'étend sur une grande partie de l'année. D'un point de vue industriel, la mangue présente trois parties intéressantes pour la transformation : la pulpe, la peau et le noyau.

La pulpe, produit principal de la mangue, est utilisée pour la fabrication de chutney, de produits séchés, de poudre (Amchoor) et de panna (boisson de mangue verte) quand les mangues sont au stade vert mature (Martin and He, 2009). Au stade mûr, les mangues sont principalement consommées en tant que fruits frais mais la pulpe peut être transformée en purée, compote, conserve, jus, nectar, confiture, fruits au sirop, etc. (Bonneau, 2018; Martin and He, 2009).

En ce qui concerne les coproduits, la peau est le principal coproduit de la mangue ; elle est riche en substances phytochimiques antioxydantes telles que les caroténoïdes, les polyphénols, les anthocyanes et les composés volatils. Elle peut être utilisée dans différentes formulations alimentaires en tant que fibres alimentaires (Berardini et al., 2005; Martin and He, 2009). En outre, la peau des mangues est utilisée pour la production de biogaz et la fabrication de nourriture pour animaux (Varakumar et al., 2012). Quant au noyau, il est utilisé pour la production d'huile et de poudre de noyau de mangue. Les produits obtenus à partir des noyaux de mangue ont fait l'objet de nombreuses études qui ont démontré leurs actions antioxydantes et antimicrobiennes en raison de leur forte teneur en polyphénols (Martin and He, 2009).

Ces travaux de thèse intégrés dans le projet Interfaces, s'intéressent spécifiquement à la production, transformation et consommation de mangues dans les pays de l'Afrique de l'Ouest qui représentent une grande source de pertes post-récolte dans le monde.

1.6. La mangue en Afrique de l'Ouest : Production, transformation et consommation

Vers la fin des années 1960, le Mali fut le premier pays de l'Afrique de l'Ouest à exporter des mangues vers l'Europe suivi par le Burkina Faso, la Guinée, le Sénégal, et surtout la Côte d'Ivoire, dont les exportations ne cessent d'augmenter (Rey et al., 2004). Aujourd'hui, ces pays représentent 75 % de la production totale de mangues dans l'Afrique de l'Ouest. Dans ces pays, les mangues sont soit vendues sur les marchés locaux, soit exportées principalement vers l'Europe (la France, l'Allemagne et la Belgique) pour une consommation en tant que fruits frais

ou pour la transformation en mangues séchées, en jus ou en purées. Les principales variétés d'exportation dans ces pays Africains sont l'Amélie, la Kent, la Keitt, la Brooks, la Holden, la Valencia et la Palmer (Rey et al., 2004). La production de mangues dépend de la variété et du pays producteur mais la saison des mangues en Afrique de l'Ouest dure généralement de mars jusqu'à juillet.

Dans certains pays de l'Afrique de l'Ouest, la production des mangues reste limitée et destinée à une consommation locale en tant que fruits frais au sein des familles ou à une vente locale pour une consommation fraîche (Van Melle and Buschmann, 2013; Vannière et al., 2004).

1.7. Composition nutritionnelle de la mangue

La mangue est composée en moyenne de 60 à 75 % de pulpe, de 11 à 18% de peau et 14 à 22% de noyau. Ces pourcentages peuvent varier en fonction de la variété, le tableau 2 présente la composition en pulpe, en peau et en noyau des principales variétés de mangues (Paull and Duarte, 2011; Tharanathan et al., 2006).

Tableau 2 : Composition en pulpe, peau et noyau des principales variétés de mangues (Tommy Atkins, Kent, Keitt, et Haden).

Variétés	Poids (g)	% Pulpe	% Peau	% Noyau
Tommy Atkins	450 - 710	86,80	8,08	5,1
Kent	450 - 750	80,35	13,43	6,5
Keitt	450 - 680	82,48	11,31	6,3
Haden	340 - 560	75,80	17,50	6,3

La pulpe de mangue, constituée d'environ 80% d'eau et 20% de matières sèches, est reconnue pour sa valeur nutritive élevée et son apport énergétique moyen (60 kcal pour 100 g de pulpe). Sa composition dépend de plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques tels que la variété, la zone géographique, le climat, le stade de maturation, les conditions de stockage, etc. (Martin and He, 2009; Tharanathan et al., 2006). Malgré cela, les constituants principaux de la pulpe de mangue sont les sucres (glucose, fructose, saccharose), les acides organiques, les protéines, les lipides (acides gras saturés, polyinsaturés et mono-insaturés dont l'acide palmitique, l'acide linoléique, l'acide alpha linoléique et l'acide oléique), les vitamines (vitamine A, provitamine A (β-carotène) et vitamine C) et les minéraux (calcium, fer, magnésium, phosphore, potassium,

sodium, zinc, cuivre, manganèse et sélénium) (Tableau 3) (Maldonado-Celis et al., 2019). La pulpe des mangues vertes présente une source importante d'amidon et de pectines (Bello-Pérez et al., 2007).

La pulpe de mangue mature contient environ 15% de sucres avec le fructose comme principal monosaccharide. Par exemple, la teneur totale en sucre des variétés Tommy Atkins, Haden, Kent et Keitt pour 100 g de pulpe est d'environ 14,98 g (saccharose : 6,97 g, glucose : 2,01 et fructose : 4,68 g) et de 1,6 g de fibres alimentaires pour 100 g de pulpe (USDA, 2015). Les pectines sont également très abondantes dans la pulpe des mangues vertes et sont considérées comme des composés gélifiants. Comme dans de nombreux fruits, les protéines et les lipides y sont présents en faibles teneurs (environ 0,82% et 0,38%, respectivement). Ces teneurs, ainsi que la composition en acides aminés, varient en fonction du cultivar et du degré de maturation. À maturité, l'alanine, l'arginine, la glycine, la sérine, la leucine et l'isoleucine se trouvent en haute concentration (Maldonado-Celis et al., 2019). En ce qui concerne les acides organiques présents dans la pulpe de la mangue, il s'agit d'acides di- et tricarboxyliques dont l'acide malique, citrique, pyruvique, oxalique, tartrique et succinique. Les acides majoritaires responsables de l'acidité des mangues sont les acides citrique et malique, avec l'acide citrique comme acide principal (Maldonado-Celis et al., 2019; Tharanathan et al., 2006). La pulpe contient aussi des quantités importantes de composés phénoliques, reconnus notamment pour leur activité antioxydante.

La peau de mangue contient de la vitamine E, de la vitamine C, des polyphénols, des caroténoïdes, des fibres alimentaires dont environ 28% de fibres solubles et 50% d'insolubles, et des composés phénoliques (Ajila and Prasada Rao, 2013). Le noyau, riche en polyphénols, est une importante source de composés antioxydants et antimicrobiens. En plus de sa teneur en polyphénols constituant 70% du contenu total de polyphénols dans la mangue, la graine de mangue contient en moyenne 77% de glucides, 11% de matières grasses, 6% de protéines et 2% de fibres (Martin and He, 2009).

Tableau 3 : Composition chimique de la pulpe des principales variétés de mangues

Constituants	Teneur pour 100g de pulpe
Nutriments	
Eau	83,46 g
Calories	60 kcal

Protéine	0,82 g
Lipides	0,38 g
<i>(0,092 g lipides saturés, 0,14g monoinsaturés et 0,071 g de lipides polyinsaturés)</i>	
Carbohydrites	14,98 g
Fibre	1,6 g
Sucres totaux	13,66 g
<i>(Sucrose : 6,97 g, fructose 4,68g et glucose 2,01g)</i>	
Vitamines	
Vitamine A	1082 IU
Thiamine (B1)	0,028 mg
Riboflavine (B2)	0,038 mg
Niacine (B3)	0,669 mg
Acide pantothénique (B5)	0,197 mg
Pyridoxine (B6)	0,119 mg
Vitamine C	36,4 mg
Vitamine E	0,9 mg
β-carotène	640 µg
B-cryptoxanthine	10 µg
Lutéine et zéaxanthine	23 µg
Folate	43 µg
Minéraux	
Calcium, Ca	1 mg
Fer, Fe	0,16 mg
Magnésium, Mg	10 mg
Phosphore, P	14 mg
Potassium, K	168 mg
Sodium, Na	1 mg
Zinc, Zn	0,09 mg
Cuivre, Cu	0,11 mg
Manganèse , Mn	0,063 mg
Sélénium, Se	0,6 µg
Acides aminés	0,676 g

Valeurs moyennes obtenues pour les cultivars Tommy Atkins, Keitt, Kent, et Haden ; USDA, National Nutrient Database for Standard Reference (2015).

1.8. Les pertes post-récolte de la mangue

La production des mangues est saisonnière et très abondante sur certaines périodes de l'année ce qui induit des pertes pouvant atteindre 20 à 40 % de la production dans certains pays du Sud tel que le Pérou, le Mexique, les pays de l'Afrique de l'Ouest, le Pakistan, l'Inde, etc. (Rivier et al., 2009; Sab et al., 2017). Plusieurs facteurs contribuent aux pertes post-récolte, mais la périssabilité de la mangue est l'un des facteurs principaux entraînant ces pertes. En effet, la mangue est un fruit qui ne se conserve pas très longtemps, non seulement à cause des modifications qui ont lieu au cours de la maturation, mais aussi à cause de la sensibilité aux attaques d'insectes nuisibles et aux maladies post-récolte telle que l'anthracnose (Barboza et al., 2016). En outre, des blessures mécaniques, rapidement colonisées par des levures et des moisissures (Rivier et al., 2009), les mauvaises pratiques agricoles, le manque de connaissances en matière de traitements post-récolte (contrôle inadéquat de la température et de l'humidité relative pendant le stockage), le transport, la manutention pendant la commercialisation contribuent aussi à ces pertes (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018).

1.9. La transformation de la mangue

Pour limiter les pertes post-récolte, et par conséquent contribuer à une amélioration économique dans plusieurs pays producteurs du Sud, de nouvelles stratégies sont déployées pour améliorer les pratiques agricoles post-récolte. La transformation de la mangue en produits stabilisés capables d'être conservés sur une longue période semble aussi être une solution de réduction de ces pertes. Les produits transformés de la mangue les plus couramment rencontrés sont les : mangues de 4^{ème} gamme, mangues séchées, purées, confitures, jus, nectars, vins et alcools de mangues.

Les mangues de 4^{ème} gamme

Les produits de 4^{ème} gamme sont des produits faiblement transformés et définis comme étant frais. Ces produits peuvent être issus d'un lavage, d'un pelage, d'un parage, d'une découpe, d'une désinfection et d'un conditionnement dans un emballage approprié sous des conditions d'atmosphère et de température leur permettant de maintenir une fraîcheur tout au long de la conservation. Il existe différentes formes de mangue de 4^{ème} gamme, telles que les tranches, les morceaux, les cubes ou les cylindres, conditionnés dans des sachets, des barquettes, des bocaux

ou des gobelets en plastique permettant une limitation de la prolifération ou de la contamination microbienne et une meilleure conservation des propriétés physico-chimiques de la qualité (Djioua et al., 2010; Kasse, 2015).

Les mangues séchées

Le séchage est l'un des plus anciens procédés de transformation des aliments, principalement utilisé pour l'obtention de produits stabilisés capables d'être conservés longtemps (Fao, 2010; Rivier et al., 2009). Ce procédé, consiste en une réduction de l'activité de l'eau (a_w) par évaporation de l'eau contenue dans l'aliment, ici la mangue. Cet abaissement de l'activité de l'eau limite la prolifération microbienne et ralentit les dégradations enzymatiques (Djantou Njantou Elie Baudelaire, 2006; Rivier et al., 2009).

Les mangues séchées peuvent être classées en produits de bouche et en produits composés. Les produits de bouche sont conservés en sachets/barquettes pour une consommation directe en tant que « snack ». Ces produits, au taux d'humidité résiduelle d'environ 35% et auxquels sont ajoutées du sucre pour leurs conservations, sont appréciés pour leur texture moelleuse. Ils subissent généralement une pasteurisation ou un ajout de conservateur pour améliorer leur durée de vie. Les produits composés, d'humidité résiduelle d'environ 10 - 15%, sont utilisés pour la fabrication de mélanges céréaliers (muesli, mélange céréales et fruits, barres céréalières) ou même pour la fabrication de confiseries, yaourts, compotes, glaces, pâtisseries, etc. (Fao, 2010; Rivier et al., 2009).

Les purées de mangues

La purée de mangue est obtenue à partir d'un broyage de la partie comestible de la mangue, la pulpe. Cette étape de broyage peut être suivie d'une étape de tamisage afin d'obtenir une purée parfaitement lisse (Agri Logic, 2019; Codex alimentarius, 2005). Il existe deux types de purées de mangues : *les purées de concentration naturelle* et *les purées concentrées*. *Les purées de concentration naturelle* sont obtenues suite à un broyage de la pulpe de mangue, sans l'élimination d'une partie de leur eau, suivie par un traitement thermique pasteurisation à 100°C pendant 2 minutes. *Les purées concentrées*, quant à elles, subissent une élimination de l'eau partielle par voie mécanique avant la pasteurisation et le conditionnement.

Les purées de mangue sont largement utilisées dans l'industrie alimentaire pour aromatiser les pâtisseries, pour la fabrication de boissons (jus et nectars), de confitures, de glaces, de produits laitiers, et des aliments pour bébés (Siddiq et al., 2017; T. and Jr., n.d.). Bien que les purées de mangues soient globalement utilisées comme produits intermédiaires, des petites quantités de

purées de mangue sont également commercialisées comme produits finaux pour consommation directe (Cancela and Maceiras, 2007). Le marché des purées de mangues, bananes et ananas est en pleine croissance avec un taux de croissance annuel composé (TCAC) estimée à 4,4% jusqu'en 2023 surtout dans les industries alimentaires pour bébés (Agri Logic, 2019).

La confiture de mangues

Les confitures de mangues sont obtenues à partir de morceaux de pulpe de mangue auxquels sont ajoutés du sucre, des pectines, du chlorure de calcium et de l'acide citrique. Ce mélange est mis à bouillir avec une agitation régulière afin d'obtenir un mélange homogène de consistance souhaitée. Les confitures sont conditionnées à chaud dans des emballages en verre hermétiquement fermés pour une longue conservation (Siddiq et al., 2017).

Les jus de mangues

Les jus de fruits sont définis comme le filtrat non fermenté mais fermentescible, issu de la partie comestible du fruit sain, parvenu au degré de maturation approprié (Codex alimentarius, 2005). Il existe deux types de jus de mangues obtenus à l'échelle industrielle : le jus pulpeux et le jus clarifié. Les jus pulpeux et clarifiés de mangues sont tous deux obtenus à partir de la pulpe, préalablement blanchie et broyée.

Dans le cas de jus pulpeux de mangue, le broyat de pulpe subit seulement un pressage et une filtration avant l'étape de pasteurisation et conditionnement. Dans le cas des jus clarifiés, le filtrat obtenu après pressage et filtration sera traité par des enzymes pectolytiques ou par des agents de clarification avant de subir une deuxième filtration suivie par une pasteurisation et un conditionnement (Siddiq et al., 2017).

Le nectar de mangues

Les nectars de mangues sont des boissons obtenues à base de purée de mangue, pressée et filtrée, ou de jus pulpeux, auxquels sont ajoutés de l'eau et du sucre, des édulcorants et de l'acide pour une légère acidité (Codex alimentarius, 2005). Comme pour les jus pulpeux et les jus clarifiés, les nectars sont pasteurisés avant conditionnement.

Le vin et l'alcool de mangues

La transformation des mangues en boissons alcoolisées constitue un réel moyen pour valoriser les fruits très mûrs généralement non-valorisables à cause de leur texture très molle et leur concentration élevée en sucres.

Les vins et alcools de mangues sont obtenus par fermentation de purée ou de jus de mangues très mûres en y rajoutant des levures, telles que *Saccharomyces cerevisiae*, dans des conditions bien déterminées (Dupaigne, 1965; Reddy and Reddy, 2007; Reddy et al., 2014; Varakumar et al., 2012). Notons que les molécules bioactives présentes dans la mangue confèrent à ces boissons une activité antioxydante considérable.

1.10. Le suivi de la qualité des fruits : mesures physiques et physico-chimiques conventionnelles et innovantes

L'évaluation de la qualité des mangues par des mesures spécifiques est généralement réalisée au moment de la récolte et lors de la transformation des fruits. En effet, différents indicateurs de maturité existent pour estimer les stades optimaux de récolte dans le but d'obtenir des fruits frais et des produits transformés de meilleures qualités organoleptiques (Valente et al., 2019). Le contrôle de la qualité au moment de la récolte est effectué pour s'assurer que les mangues ont atteint un degré de maturité adéquat pour la cueillette (stade vert mature), ce qui permettra aux fruits de développer ses caractéristiques organoleptiques (couleur, arôme et saveur) durant la maturation. Après la récolte, le degré de mûrissement ciblé dépendra du devenir des mangues : vente en tant que fruits frais, exportation des fruits frais par bateau ou par avion, transformation des fruits en produits divers.

Des analyses physiques et physico-chimiques sont également réalisées au cours de la transformation des mangues, afin de constituer des lots de fruits homogènes en terme de maturité pour assurer une bonne fabrication des produits transformés (Bonneau, 2018).

Les stades de maturation (au moment de la récolte) et de mûrissement (post-récolte) des mangues sont souvent déterminés par un opérateur à partir de simples évaluations telles que l'appréciation de la couleur du fruit, de son anatomie (forme, taille), de sa fermeté au toucher (palpation du fruit) et de son âge physiologique (nombre de jours après la floraison). Néanmoins, ces indicateurs sont subjectifs et dépendent largement du savoir-faire de l'opérateur.

Actuellement, des outils et des mesures physiques et physico-chimiques instrumentaux sont proposés pour une détermination objective des stades de maturation et mûrissement afin de contrôler les propriétés des fruits, surtout ceux destinés à la transformation. Parmi ces outils, on retrouve des méthodes conventionnelles permettant d'estimer la maturité des fruits en évaluant leur fermeté, leur couleur, leur teneur en sucre et leur acidité titrable. La majorité de ces mesures conventionnelles sont destructives et nécessitent des préparations particulières du

fruit. Il existe également des techniques plus innovantes non-destructives respectant l'intégrité du fruit ; il s'agit de mesures acoustiques (ultrasons) et de mesures optiques (fluorescence, spectroscopie en proche et moyen infra-rouge).

1.10.1 Caractéristiques et propriétés conventionnellement mesurées

La fermeté

La fermeté des mangues est l'une des caractéristiques les plus importantes pour l'évaluation des stades de maturation et mûrissement. Tel que détaillé précédemment, le ramollissement des fruits climactériques durant la maturation est principalement lié à l'hydrolyse des pectines présentes dans les parois cellulaires (Tharanathan et al., 2006). Ainsi, la diminution de la fermeté indique, généralement, un avancement de la maturation des fruits (Jarimopas and Kitthawee, 2007).

Les tests destructifs, tels que la pénétrométrie, sont couramment utilisés pour évaluer la fermeté des fruits d'une façon simple et rapide. La fermeté pénétrométrique représente la force maximale, exprimée généralement en Newton (N), de pénétration dans le fruit, épluché ou non, jusqu'à une profondeur définie (Valente et al., 2019). Des mesures non-destructives peuvent également être utilisées pour évaluer la fermeté des fruits comme des mesures acoustiques et spectrales ou d'autres types de mesures texturales. (Slaughter, 2009). Ces mesures texturales non-destructives sont effectuées à l'aide de duromètres manuels ou statiques (Jarimopas and Kitthawee, 2007; Valente et al., 2011; Valero et al., 2007).

La couleur de la pulpe et de la peau

La couleur de la peau et de la pulpe représente des attributs de qualité des mangues. Elle peut être mesurée à l'aide de colorimètres ou de spectrophotomètres. Les colorimètres sont des instruments conçus pour quantifier la couleur en terme de perception humaine. Les valeurs obtenues sont exprimées souvent dans le système CIELAB (Commission internationale de l'éclairage, abrégé CIE pour son nom français) avec L* la luminance, a* la rougeur et b* le jaunissement (Jha et al., 2007). Les spectrophotomètres sont conçus pour fournir des informations plus détaillées sur les propriétés optiques de l'échantillon (Slaughter, 2009).

L'acidité titrable (AT)

L'acidité de la pulpe de mangue est un indicateur de qualité des fruits. Les degrés d'acidité sont obtenus par des dosages acido-basiques.

Le degré Brix (°Bx) ou extrait sec soluble (ESS)

Le degré Brix exprime la teneur en extraits secs solubles présents dans l'échantillon. Il est évalué grâce à un réfractomètre et est exprimé en grammes par 100 grammes de produit. La majorité des extraits secs solubles étant des sucres, le degré Brix permet d'évaluer la teneur en sucre dans le fruit.

1.10.2 Outils de caractérisation innovants

Les méthodes conventionnelles sont largement utilisées pour la détermination des indicateurs de qualité des fruits en lien avec la maturation. Cependant, bien que ces techniques soient fiables, ce sont des méthodes destructives, parfois laborieuses et induisant des pertes (Magwaza and Tesfay, 2015). Au cours des deux dernières décennies, plusieurs mesures innovantes (physiques, optiques, acoustiques, etc.) ont été développées pour évaluer et déterminer, d'une manière non-destructive, les indicateurs de maturité et de qualité de la mangue.

a) Mesure physique

La mesure de la densité, mesure physique non-destructive, a été adoptée pour la détermination de la qualité des fruits. Hor et al., 2020, ont reporté que la densité peut être utilisée comme indicateur pour la prédiction à la fois des qualités sensorielles et des propriétés nutritionnelles de la mangue. Ces auteurs ont montré que la densité est corrélée avec plusieurs indicateurs de qualité tel que les arômes, la fermeté et la couleur des mangues.

b) Mesures spectroscopiques

La spectroscopie de fluorescence

La spectroscopie de fluorescence présente un important avantage dans l'analyse des produits alimentaires, en raison de sa sensibilité et sélectivité (Fernández-Romero and Aguilar-Caballós, 2019). Cette méthode rapide et non-destructive donne des informations sur la présence des molécules fluorescentes et sur leur environnement dans les échantillons analysés.

La fluorescence de la chlorophylle est l'une des techniques les plus populaires en physiologie végétale permettant de comprendre les mécanismes fondamentaux de la photosynthèse, les réponses des plantes aux variations environnementales et les changements au cours du développement des végétaux (Murchie and Lawson, 2013).

La mesure de la fluorescence de la chlorophylle a été utilisée pour l'évaluation des stades de maturité des mangues (Lechaudel et al., 2010; Ullah et al., 2016), des baies de raisin (Kolb et al., 2006), de la papaye (Urbano Bron et al., 2004), de la tomate (Groher et al., 2018; Hoffmann et al., 2015) ainsi que de la pomme (Huybrechts et al., 2003). Cette méthode a été aussi efficace pour prédire les dates optimales de récolte des mangues de la variété « Cogshall », en particulier pour le marché d'exportation (Léchaudel et al., 2013). D'autres études ont montré l'intérêt des analyses en fluorescence dans l'évaluation des changements biochimiques durant les stades de développement des fruits du mûrier (Lou et al., 2012) et dans la détermination des anthocyanes des fruits de l'olivier à différents degrés de pigmentation (Agati et al., 2005).

La spectroscopie en proche infra-rouge

La spectroscopie en proche infra-rouge est une technique prometteuse pour l'évaluation de la qualité des produits agricoles (Camps and Christen, 2009; Lan et al., 2020a; Nicolaï et al., 2007). Cette technique rapide et non-destructive, permet de prédire plusieurs paramètres à partir d'une mesure spectrale (Lan et al., 2020a). Plusieurs études ont montré l'intérêt de ces mesures spectrales pour la détermination de certaines caractéristiques intrinsèques des fruits comme la pomme (Lan et al., 2020a; Nicolaï et al., 2007). Par exemple, il est possible de déterminer à partir des spectres en proche IR différents paramètres comme la fermeté, l'extrait sec soluble, l'acidité titrable, la teneur en amidon, la teneur en chlorophylle et l'état de maturation des pommes (Jha et al., 2014, 2012; Nicolaï et al., 2007; Zude et al., 2006). Pour la mangue, la spectroscopie en proche IR a permis de prédire la fermeté, la concentration d'extrait sec soluble, l'acidité titrable et la matière sèche des fruits (Nordey et al., 2017) (Nordey et al., 2019). De plus, des corrélations intéressantes ont également été établies entre les spectres en proche IR et des paramètres physiologiques de la mangue (Schmilovitch et al., 2000).

La spectroscopie en moyen infra-rouge

Depuis les années 2000, l'utilisation de la spectroscopie en moyen-infra rouge dans le domaine agro-alimentaire ne cesse d'augmenter en raison de la rapidité de l'analyse, de la petite taille des échantillons, de la sensibilité de la méthode, de l'absence de produits toxiques, du faible coût et de la possibilité d'analyser de multiples états physiques (gaz, liquides, solides, matériaux amorphes, films, poudres et polymères) (Bureau et al., 2019).

La spectroscopie en moyen infra-rouge a fait ses preuves pour la détermination des sucres simples (saccharose, glucose, fructose) et des acides organiques (acide malique et acide citrique) présents dans des bouillies d'abricot (Bureau et al., 2009). Cette méthode a été aussi

efficace pour prédire la concentration des sucres des jus de mangues (Jha and Gunasekaran, 2010) et des morceaux de pulpe de mangue (Olale et al., 2017). D'autres études ont montré l'intérêt des analyses spectrales en moyen infra-rouge pour prédire la qualité des tomates (Ścibisz et al., 2011), la composition du jus de raisin blanc (N. Shah et al., 2010) et la composition des parois cellulaires de différents fruits et légumes (Canteri et al., 2019).

c) Mesures acoustiques

Les mesures acoustiques ultrasonores sont des mesures non-destructives idéales pour caractériser la qualité des aliments solides et liquides et pour quantifier leurs compositions. Elles permettent d'étudier la microstructure des matériaux et d'établir des relations entre cette microstructure et les propriétés mécaniques (Kim et al., 2004; Valente et al., 2013).

2. Les purées de fruits

2.1. Spécificités des purées de fruits

2.1.1 Préambule : cellules et parois végétales

Les cellules végétales sont principalement constituées d'eau (70 à 90%) et de polysaccharides tels que la cellulose, l'hémicellulose et de pectines. La paroi végétale est l'élément principal de la structure de ces cellules. Elle donne aux cellules une morphologie et une rigidité due à sa structure semi-rigide.

La paroi végétale est constituée d'une lamelle moyenne composée essentiellement de polysaccharides pectiques et de protéines (Buergy et al., 2020; Jarvis et al., 2003) assurant la cohésion entre les cellules. À cette lamelle moyenne, se rajoutent une paroi primaire fine, souple, riche en microfibrilles de cellulose et faiblement résistante aux actions mécaniques (Espinosa-Muñoz et al., 2012) et une paroi secondaire épaisse, rigide et fortement résistante aux sollicitations mécaniques qui se trouve entre la membrane cytoplasmique et la paroi primaire (Figure 6) (Jarvis et al., 2003).

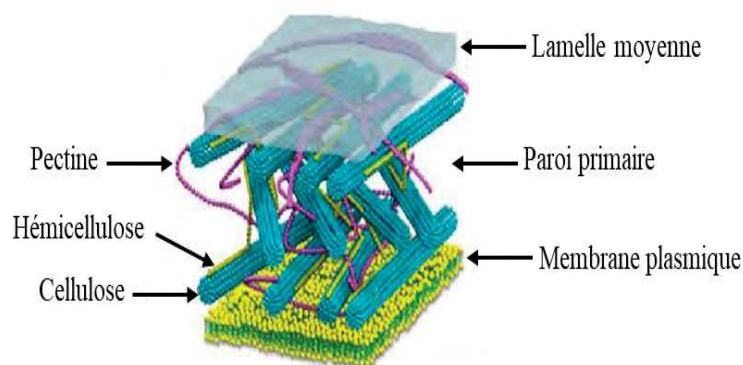


Figure 6 : Schéma de la paroi cellulaire végétale, inspirée de (Dejean, 2011).

Les polysaccharides sont les composants majoritaires (90 à 95%) de la paroi végétale et lui confèrent ses propriétés mécaniques. Les principaux polysaccharides présents dans les parois végétales sont la cellulose, les hémicelluloses et les pectines (Buergey et al., 2020; Waldron et al., 2003). Les interactions entre les polymères de pectines et les autres polysaccharides pariétaux peuvent être covalentes, ioniques, non covalentes et non ioniques (Leverrier, 2016). Le reste des composants pariétaux sont des protéines, des glycoprotéines et des composés phénoliques.

Compte tenu de leur rôle dans la texture et la structure des suspensions végétales, les polysaccharides pariétaux seront brièvement décrits ci-dessous.

La cellulose

La cellulose est le composant majoritaire des parois cellulaires (Gawkowska et al., 2018). C'est un homopolymère insoluble dans l'eau constitué de D-glucopyrannose assemblé par des liaisons β (1 $\rightarrow$ 4) (Cárdenas-Pérez et al., 2018; Gawkowska et al., 2018). Les chaînes de cellulose sont organisées en microfibrilles cristallines d'environ 30 nm de diamètre et forment l'élément structurel des parois. Les fibres de cellulose sont entourées d'une matrice amorphe d'hémicelluloses et de pectines auxquelles s'ajoutent des glycoprotéines. Cette matrice, fortement hydrophile, présente des propriétés de gonflement ce qui confère une plasticité aux parois cellulaires (notamment parois primaires) (Cárdenas-Pérez et al., 2018; Gawkowska et al., 2018).

Les hémicelluloses

Les hémicelluloses sont des polymères insolubles dans l'eau et composés d'un squelette de liaisons glycosidiques (1 $\rightarrow$ 4) de D-pyranose sur lequel se greffent d'autres monomères glucidiques (D-galactose ou l'acide D-glucuronique). Liées aux microfibrilles de la cellulose

par des liaisons hydrogènes, les hémicelluloses participent à la consolidation de la paroi végétale. Les chaînes d'hémicelluloses sont plus courtes que les chaînes de la cellulose (Cárdenas-Pérez et al., 2018; Gawkowska et al., 2018).

Les pectines

Les pectines sont des polysaccharides complexes à haut poids moléculaire riches en acide D-galacturonique et chargés négativement (Bello-Pérez et al., 2007; Buergy et al., 2020; Flutto, 2003; Lara-Espinoza et al., 2018) (Figure 7). Elles sont présentes dans la paroi cellulaire primaire et dans la lamelle moyenne assurant la cohésion entre les cellules (Lara-Espinoza et al., 2018). Les pectines jouent un rôle dans le transport des ions entre les cellules et dans l'activation du système immunitaire des plantes (Gawkowska et al., 2018).

Les différentes fonctions des pectines dépendent de leur structure ainsi que de leur concentration dans les parois cellulaires. Ces caractéristiques sont variables en fonction de l'origine et de la variété du fruit, mais surtout en fonction des modifications biochimiques et enzymatiques qui ont lieu durant les périodes de croissance, de maturation, de stockage et de transformation des fruits (Gawkowska et al., 2018).

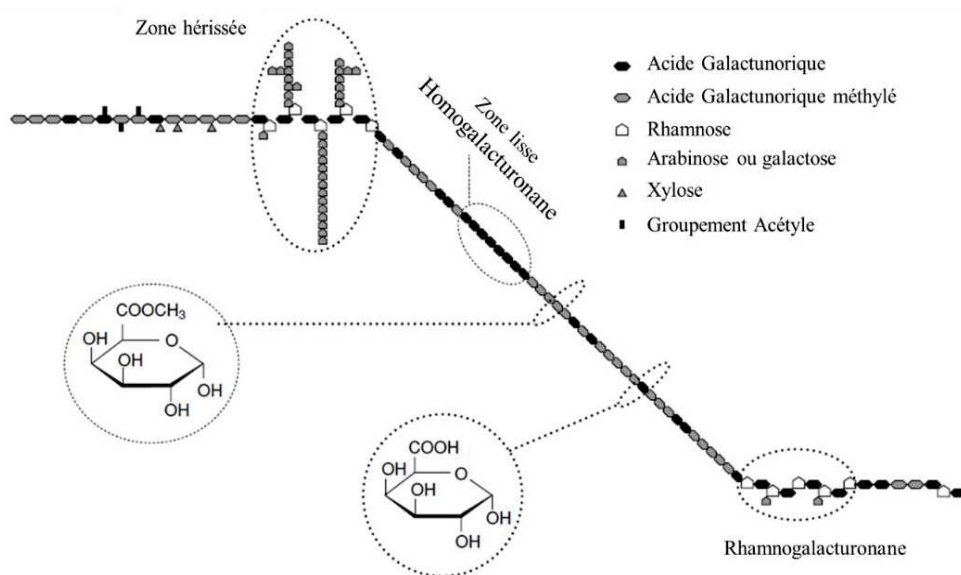


Figure 7 : Schéma de la structure des pectines (Flutto, 2003).

Les pectines sont classées en deux groupes en fonction de leur degré de méthylation (proportion de groupements carboxyles —COOH estérifiés par le méthanol) :

1. Les pectines *hautement méthylées* (*HM - High Meth*) avec un degré de méthylation (DM) supérieur à 50 %.
2. Les pectines *faiblement méthylées* (*LM – Low Meth*) avec un DM inférieur à 50% obtenues suite à différentes réactions biochimiques que subissent les pectines *HM* (Gawkowska et al., 2018). Ces pectines sont plus stables à l'humidité et la chaleur que les pectines hautement méthylées (Lara-Espinoza et al., 2018).

Les pectines se caractérisent par leurs propriétés gélifiantes qui peuvent moduler la texture des suspensions végétales (Gawkowska et al., 2018). Le mécanisme d'association des pectines lors de la formation de gels dépend fortement de leur degré de méthylation. Les pectines *HM* forment un gel en présence d'une forte concentration en sucres (55 - 75 %) et à un pH variant entre 2,5 et 3,5 alors que le gel des pectines *LM* se forme en présence d'ions calcium (Ca^{2+}) à un pH compris entre 2 et 6 (Gawkowska et al., 2018; Lara-Espinoza et al., 2018).

2.1.2 Définition et structure des purées de fruits

Les purées de fruits sont des suspensions de particules végétales, principalement constituées de cellules de parenchyme (cf. définition parenchyme, encadré 3) suspendues dans une solution aqueuse, obtenues suite à un traitement mécanique (le broyage) et/ou un traitement thermique de la partie comestible des fruits (Espinosa Brisset, 2012; Leverrier, 2016). Ces suspensions complexes sont constituées de deux phases : une phase continue (dite dispersante) et une phase dispersée. La phase dispersante est une solution aqueuse, appelée sérum. Il est riche en solutés divers et représente la phase continue des suspensions de particules végétales (Katlijn R N Moelants et al., 2014). La phase dispersée correspond, quant à elle, à des colloïdes (entités submicroniques de taille comprise approximativement entre 1 nm et 1 μm) et à des particules plus grosses de taille variable (cellules individuelles, amas de cellules, fragments de cellules parenchymateuses) (Buergy et al., 2020; Dahdouh et al., 2018; Espinosa et al., 2011; Leverrier, 2016; Ricci et al., 2021).

Encadré 3 : Le parenchyme

Le parenchyme est le **tissu végétal fondamental** qui prédomine dans la plupart des organes végétaux. Il est le siège des **fonctions élaboratrices** de la plante (photosynthèse et stockage des réserves). Les tissus parenchymateux présentent des cellules celluloseuses de formes différentes (isodiamétriques ou allongées, plus ou moins arrondies dans les angles).

Le sérum contient essentiellement des sucres, des substances pectiques solubilisées, des sels et des acides organiques solubles. La nature, la maturité et la variété du fruit ainsi que le procédé de fabrication des purées affectent la composition biochimique du sérum (Espinosa Brisset, 2012; Leverrier, 2016). La viscosité du sérum varie en fonction de sa composition biochimique (Colin-Henrion et al., 2007). Par exemple, la concentration des pectines solubles ainsi que leurs caractéristiques (longueur des chaînes, masse moléculaire, etc.) sont des éléments essentiels affectant les propriétés texturales du sérum (Leverrier, 2016).

Les cellules parenchymateuses végétales, constituant majeur de la phase dispersée, sont des particules insolubles, molles et déformables variant en taille, forme et rigidité (Espinosa-muñoz et al., 2013; Leverrier, 2016; Ricci et al., 2021). Les propriétés des parois végétales de ces cellules constituent un élément majeur qui déterminent la structure et la texture des suspensions de particules végétales (Espinosa Brisset, 2012; Leverrier, 2016; Waldron et al., 2003).

Ainsi, la nature, la concentration, l'organisation et la taille des particules dispersées ainsi que les propriétés du sérum jouent un rôle majeur dans la structure et la texture d'une purée de fruits (Buergy et al., 2020). Ces caractéristiques varient en fonction de facteurs intrinsèques tels que la variété du fruit et son stade de maturation et de facteurs extrinsèques comme la nature ou le type de traitement (thermique, mécanique) appliqué lors de la transformation du fruit en purée (Espinosa Brisset, 2012; Ricci et al., 2021).

2.2. Les comportements rhéologiques des purées de fruits

La rhéologie est la science qui permet d'étudier les propriétés d'écoulement et de déformation d'une matrice. Elle est étroitement liée à la composition et à la structure du produit.

Les propriétés rhéologiques des suspensions de fruits dépendent de nombreux facteurs tels que les propriétés de la phase dispersante et la concentration, la taille, la forme et la déformabilité des particules en suspension (Colin-Henrion et al., 2007). Ces paramètres modulent les interactions entre les particules ainsi que celles entre les particules et la phase dispersante. Ces interactions (particules/particules et particule/phase dispersante) jouent également un rôle crucial dans le comportement rhéologique des suspensions (Espinosa Brisset, 2012).

2.2.1 Propriétés d'écoulement

La viscosité apparente (viscosité dynamique) est définie comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement (τ , Pa) et la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) (Eq. 1) :

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Eq. 1}$$

μ_a : viscosité apparente (Pa.s) ; τ : contrainte de cisaillement (Pa) ; $\dot{\gamma}$: gradient de cisaillement (s^{-1}).

Les purées de fruits présentent généralement un comportement rhéofluidifiant avec un seuil d'écoulement (Espinosa-muñoz et al., 2013; Leverrier et al., 2016; Katlijn R N Moelants et al., 2014; Xu et al., 2017, 2016). Ainsi, en appliquant une contrainte suffisante, les purées de fruits s'écoulent. Ce comportement est déterminé par des mesures rhéologiques rotationnelles permettant de suivre l'évolution de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement imposée au matériau. La viscosité apparente de ces suspensions varie suivant la température appliquée et elle diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement (Espinosa-muñoz et al., 2013; Leverrier, 2016; Xu et al., 2016).

Le caractère rhéofluidifiant de purées de fruits peut être expliqué par les réorganisations structurales qui ont lieu au sein du système en écoulement (Espinosa-Muñoz et al., 2012). Les agrégats de particules se séparent, s'organisent et s'alignent de manière à faciliter l'écoulement. Ces phénomènes sont généralement réversibles ce qui indique que ces systèmes ne présentent pas de thixotropie.

Le seuil d'écoulement est associé aux interactions entre les particules capables de former un réseau cohésif de particules. Il est défini comme la contrainte minimale τ_0 qui doit être appliquée afin que le produit commence à s'écouler. Cette contrainte minimale τ_0 engendre une rupture du réseau cohésif déclenchant ainsi son écoulement. Au-delà du seuil d'écoulement la viscosité apparente se calcule selon l'équation 2 :

$$\mu_a = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}} \quad \text{Eq. 2}$$

μ_a : viscosité apparente (Pa.s) ; τ : contrainte de cisaillement (Pa) ; τ_0 : seuil d'écoulement (Pa) ; $\dot{\gamma}$: gradient de cisaillement (s^{-1}).

Les modèles d'Ostwald (loi de puissance) et d'Herschel-Bulkley sont les plus couramment utilisés pour la détermination du comportement de suspensions végétales. D'autres modèles mathématiques sont également proposés pour modéliser le comportement en écoulement des suspensions végétales, tels que les modèles de Casson, Sisko, Bingham et Mizrahi-Berk (Tableau 4).

Tableau 4 : Modèles mathématiques utilisés pour décrire les propriétés d'écoulement des suspensions de particules végétales.

Modèle mathématique	Équations	Produits étudiés
Ostwald-de Waele (puissance)	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	Purée de bananes (Xu et al., 2016) Purée d'avocat (Ortiz-Viedma et al., 2018) Purée de mangue (Gundurao et al., 2011)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$	Purée de pomme (Espinosa-muñoz et al., 2013) Purée de carottes (Lopez-Sanchez and Farr, 2012; Katlijn R N Moelants et al., 2014) Purée de tomates (Lopez-Sanchez and Farr, 2012) Purée d'avocat (Ortiz-Viedma et al., 2018) Purée de bananes (Xu et al., 2016)
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \eta_{pl}\sqrt{\dot{\gamma}}$	Purée de piment (Cepedaand and Gómez, 2002)
Sisko	$\sigma = \sigma_\infty + K\dot{\gamma}^{n-1}$	Purée de myrtille (Nindo et al., 2007)
Mizrahi-Berk	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0 c} + K\dot{\gamma}^n$	Pulpe d'ananas et de mangue (Pelegrine et al., 2002)
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_{pl}\dot{\gamma}$	Purée d'avocat (Ortiz-Viedma et al., 2018)

τ : contrainte de cisaillement (Pa) ; τ_0 : seuil d'écoulement (Pa) ; K : indice de consistance (Pa.s) ; n : indice d'écoulement ; η_{pl} : viscosité plastique de Bingham (Pa.s) ; $\dot{\gamma}$: gradient de cisaillement (s^{-1}).

2.2.2 Mesure des propriétés viscoélastiques : Méthodes opératoires et modules

Méthodes opératoires d'évaluation d'un comportement viscoélastique

Des mesures rhéologiques oscillatoires sont réalisées pour caractériser les propriétés rhéologiques des purées de fruits. Alors que les mesures en écoulement imposent une vitesse de cisaillement ou une contrainte de cisaillement, les mesures en mode dynamique imposent des sollicitations oscillatoires de fréquence ou de déformation (ou contrainte) imposée. Ces

mesures permettent d'évaluer la microstructure du produit et plus précisément son comportement viscoélastique (Dahdouh, 2015; Espinosa Brisset, 2012). Les mesures consistent à imposer au produit un balayage en déformation ou fréquence de pulsation ω . Durant ce mouvement périodique, la déformation de cisaillement $\gamma(t)$ ainsi que la contrainte $\tau(t)$ évoluent sinusoïdalement au cours du temps. Plusieurs grandeurs dynamiques caractérisant le comportement viscoélastique sont obtenues. Il s'agit, par exemple, du module de stockage ou module élastique (G' , Pa), qui traduit le comportement solide du matériau et du module de perte ou module visqueux (G'' , Pa), qui traduit le comportement visqueux du matériau. D'autres grandeurs telles que le module complexe ou le module de cisaillement (G^* , Pa), qui est le rapport entre les valeurs maximales de la contrainte et les valeurs maximales de la déformation, l'angle de déphasage (δ) et le facteur de perte ou tangente de perte ($\tan \delta$) sont généralement retenues pour caractériser les propriétés viscoélastiques des matériaux. Le tableau 5 présente les grandeurs viscoélastiques dynamiques et les relations mathématiques utilisées pour les calculer.

Plusieurs études ont mis en évidence que les purées de fruits possèdent à la fois des propriétés visqueuses d'un fluide et des propriétés élastiques d'un solide (Espinosa Brisset, 2012). Il s'agit donc de fluides viscoélastiques avec globalement une prédominance du caractère solide ($G' > G''$) sur le domaine de viscoélasticité linéaire (domaine dans lequel les modules de stockage G' et de perte G'' sont constants) (Espinosa Brisset, 2012; Gundurao et al., 2011).

Tableau 5 : Relations utilisées pour calculer les grandeurs viscoélastiques dynamiques

Noms des grandeurs viscoélastiques dynamiques	Symboles	Relations mathématiques
Le module complexe	G^*	$G^* = \frac{\tau}{\gamma}$
Le module de stockage	G'	$G' = G^* \cos \delta$
Le module de perte	G''	$G'' = G^* \sin \delta$
Le facteur de perte/tangente de perte	$\tan \delta$	$\tan \delta = \frac{G''}{G'}$

τ : contrainte de cisaillement (Pa), δ : l'angle de déphasage et γ : la déformation.

Géométrie des modules

Selon la littérature, les géométries de type ailette (Lopez-Sanchez and Farr, 2012; Katlijn R.N. Moelants et al., 2014) et les cylindres coaxiaux (Espinosa-muñoz et al., 2013; Leverrier, 2016),

présentées dans la figure 8, sont les plus couramment utilisés pour les mesures rhéologiques des suspensions de fruits. Les géométries de type ailette sont les plus fréquentes pour des mesures oscillatoires afin d'évaluer et de comparer les propriétés viscoélastiques des purées de fruits. Ces géométries permettent de minimiser la déstructuration du produit lors de sa mise en contact avec la géométrie et les effets de glissements observés sur les suspensions de particules viscoélastiques (Leverrier, 2016; Lopez-Sanchez and Farr, 2012). Les cylindres coaxiaux permettent de travailler avec des entrefers (gap en anglais) plus importants en comparaison avec les géométries classiques tels que les géométries des plans parallèles ou du cône-plan. En effet, la taille de l'entrefer est un paramètre important à considérer lors des mesures rhéologiques réalisées sur des suspensions de particules. L'entrefer utilisé, pour ne pas perturber l'écoulement du matériau (éviter le confinement du matériau), est généralement 10 fois supérieur ou égal à la taille des plus grosses particules présentes dans la suspension (Leverrier, 2016). Les géométries cylindres coaxiaux sablés présentent aussi l'avantage de limiter les phénomènes de glissement sur les parois (Leverrier, 2016).

Hormis le choix de la géométrie, la mise en place d'un pré-cisaillement suivi d'un temps de relaxation est une pratique utilisée pour améliorer la qualité des mesures rhéologiques des purées de fruits (Leverrier, 2016; Lopez-Sanchez et al., 2012, 2011; Lopez-Sanchez and Farr, 2012; Katlijn R.N. Moelants et al., 2014).

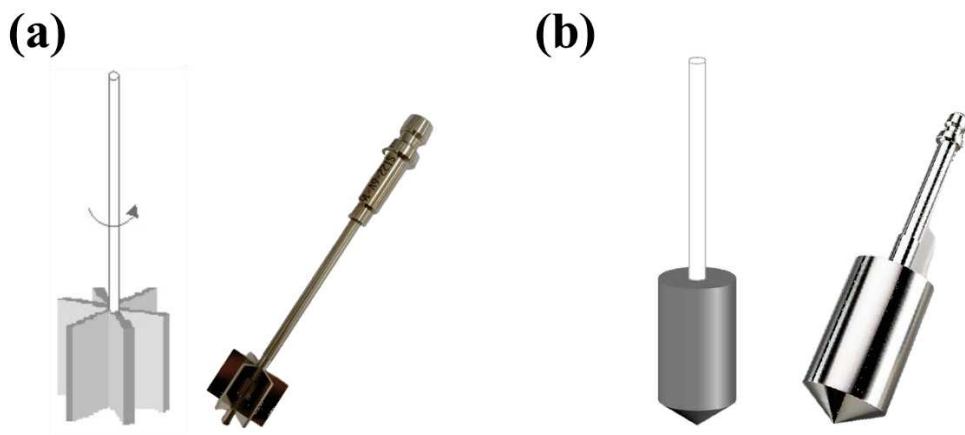


Figure 8 : Géométries utilisées pour les mesures rhéologiques des suspensions de fruit (a) la géométrie de type ailette et (b) les cylindres coaxiaux.

2.2.3 Les paramètres affectant les propriétés rhéologiques des purées de fruits

Les propriétés rhéologiques des suspensions à base de fruit varient en fonction de certains facteurs intrinsèques et extrinsèques influençant les propriétés des particules en suspension et du sérum.

Ci-dessous sont présentés les principaux facteurs, intrinsèques et extrinsèques, affectant le comportement rhéologique des purées.

a) Les facteurs intrinsèques

L'espèce et la variété du fruit

L'espèce et la variété du fruit impactent non seulement la structure du parenchyme, la morphologie des cellules et la rigidité des parois cellulaires mais également la composition chimique du fruit et par la suite les propriétés rhéologiques des purées.

La maturité du fruit

La maturation et le mûrissement des fruits est un processus naturel au cours duquel des changements biochimiques (dépolymérisation et hydrolyse enzymatique des pectines de la paroi cellulaire, augmentation progressive de la quantité de sucres, diminution de la quantité d'acides, accumulation de solutés osmotiques dans les parois cellulaires, etc.) (Brummell, 2006; Maldonado-Celis et al., 2019; Yashoda et al., 2007) aboutissent à un ramollissement du fruit (cf. 1.3). Ce ramollissement est accéléré par des changements enzymatiques qui peuvent induire une porosité des parois cellulaires, une perte d'adhésion et même une séparation des cellules (Cárdenas-Pérez et al., 2018; Hultin and Levine, 1965; Iagher et al., 2002; Yashoda et al., 2007). La texture du fruit avant transformation, modulée par tous ces phénomènes biochimiques, joue un rôle crucial dans le développement des propriétés texturales et physiques des purées lors de leur transformation.

b) Les facteurs extrinsèques

Afin d'obtenir des purées, différents procédés de transformation peuvent être employés. La nature du traitement (mécanique ou thermique) et les conditions opératoires associées ont un fort impact sur les propriétés physiques et rhéologiques des purées obtenues.

Les traitements mécaniques tels que le broyage a des répercussions directes sur la taille et la morphologie des particules. Les vitesses de broyage ainsi que la taille des pores des tamis utilisés induisent des variations de la taille et parfois de la concentration des particules. Ainsi, Leverrier et al., 2016, ont observé que la taille, la forme et la concentration des particules en suspension varient selon les conditions du broyage appliquées et que ces variations ont un effet direct sur les constantes rhéologiques (viscosité, module de stockage et module de perte) des purées de pommes. De même, Espinosa-muñoz et al., 2013, ont remarqué que la diminution de la taille des particules engendre une diminution de la viscosité et du comportement solide des purées de pommes. Ces auteurs ont également mis en évidence l'impact des conditions du broyage sur la séparation des agrégats cellulaires et donc sur la forme des particules (Espinosa-muñoz et al., 2013). En effet, les agrégats cellulaires sont caractérisés par des formes irrégulières tandis que les cellules individualisées présentent une forme plus régulière (Espinosa-muñoz et al., 2013; Lopez-Sanchez et al., 2012). D'autres auteurs, ont démontré que le broyage entraîne non seulement une réduction de la taille des particules, mais aussi des modifications structurelles au niveau des fibres qui retiennent davantage l'eau et une augmentation du volume total des pores dans les cellules (Auffret et al., 1994). Dans le cas de la tomate, il a été observé que le traitement mécanique aboutit à une diminution nette de la taille des particules accompagnée d'une intensification des interactions entre les particules et augmentation de la viscosité des purées (Lopez-Sanchez et al., 2011).

Les traitements thermiques entraînent également des modifications des propriétés physiques et rhéologiques des purées. Ils entraînent ainsi une diminution de la fermeté du fruit liée à la dénaturation des parois cellulaires. En effet, une diminution de la cohésion entre les cellules, due à la dégradation des polysaccharides pectiques ainsi qu'une séparation et un gonflement de la paroi cellulaire (Leverrier, 2016; Waldron et al., 2003) sont également observés lors d'un traitement thermique.

Il est important de souligner que les interactions entre les particules en suspension jouent un rôle important dans la rhéologie des suspensions à base de fruits. Selon la nature et l'intensité de ces interactions, différents comportement rhéologiques peuvent être observés pour les purées de fruits (Leverrier, 2016).

3. Les produits séchés

3.1. Le séchage de produits alimentaires

Le séchage est l'une des techniques les plus anciennes employées pour la préservation des denrées alimentaires (Antal, 2015). Cette technique consiste en une élimination de l'eau présente dans le produit permettant ainsi d'obtenir des produits à faible activité de l'eau (a_w), capables d'être conservés pendant une longue durée (Rivier et al., 2009). En effet, la faible activité de l'eau prévient la croissance et la prolifération des micro-organismes et ralentit la plupart des réactions chimiques et enzymatiques pouvant induire des modifications au niveau des produits transformés (Ratti, 2001). Selon, Rivier et al., (2009) un produit séché peut être considéré comme stable lorsque son activité de l'eau est inférieure ou égale à 0,6.

Outre son intérêt principal qui repose sur la conservation et préservation des produits alimentaires par élimination de l'eau, l'utilisation du séchage dans l'industrie agro-alimentaire présente plusieurs avantages (Albitar, 2011; Zeaiter, 2019):

1. Palliation du caractère saisonnier de certains produits agricoles,
2. Réduction du poids et du volume des produits facilitant l'exportation,
3. Production d'ingrédients utilisés dans une seconde transformation,
4. Limitation des pertes de récoltes.

3.2. Technologies du séchage

Il existe deux techniques utilisées pour éliminer ou abaisser l'eau contenue dans des produits alimentaires : le séchage thermique et les procédés de déshydratation par voie mécanique (e.g. filtration, décantation...).

La déshydratation par voie mécanique précède quelquefois le séchage thermique (Zeaiter, 2019). En effet, les procédés de déshydratation mécanique sont souvent utilisés comme traitement d'élimination d'une partie de l'eau dite libre (mécaniquement extractible) par pressage, centrifugation, égouttage, etc., afin d'optimiser le séchage en aval. Dans le cas d'un produit séché partiellement par voie mécanique, le séchage thermique consiste alors en une élimination de l'eau résiduelle notamment de l'eau dite liée, exclusivement éliminée par évaporation. Bien que l'évaporation puisse être réalisée par entraînement ou par ébullition (à pression normale ou sous pression réduite), seul le séchage par entraînement est capable de sécher complètement les produits alimentaires sans dégradation thermique excessive.

Les procédés d'élimination d'eau par voie mécanique ne seront pas abordés ici, seules les méthodes de séchage thermique seront exposées ci-après.

Il existe actuellement des méthodes conventionnelles de séchage et des méthodes plus innovantes. Les méthodes conventionnelles regroupent le séchage convectif par air chaud (et quelquefois à partir de vapeur d'eau surchauffée), par atomisation, par conduction, par lyophilisation, par rayonnement solaire, etc. Les méthodes innovantes comprennent le séchage par rayonnements lumineux (infra-rouge) ou électromagnétiques (micro-ondes), par champs électriques pulsés et par la technologie du CO₂ supercritique.

D'autres techniques innovantes ont été proposées pour améliorer les phénomènes de transfert lors d'une opération de séchage convectif à partir d'air chaud et améliorer la qualité du produit séché en introduisant une étape de texturation. Parmi ces techniques, on retrouve le puffing, la détente instantanée contrôlée (DIC) (Sagar and Suresh Kumar, 2010; Sulaiman, 2014) et l'intensification de vaporisation par détente vers le vide (IVDV) (Mrad et al., 2014c; Nader and Louka, 2018).

3.2.1 Les méthodes conventionnelles

Dans cette partie, quatre méthodes conventionnelles seront présentées mais seul le séchage convectif à air chaud sera détaillé, étant la technique la plus utilisée dans les industries agro-alimentaires et plus spécifiquement dans le séchage des fruits et légumes.

Cette méthode de séchage sera adoptée et associée à l'IVDV dans ce travail.

a) Le séchage convectif par air chaud

Le séchage convectif par air chaud, est la méthode la plus connue et utilisée pour l'élimination de l'eau des produits alimentaires, en raison de sa simplicité et de son équipement généralement peu coûteux et automatisable. Il consiste en une évaporation de l'eau par entraînement en mettant le produit humide dans un courant d'air assez chaud et sec. Sous l'effet du gradient de pression partielle de vapeur d'eau, l'eau s'évapore (Rivier et al., 2009; Zhao and Gao, 2016). Lors d'un séchage par entraînement, des transferts de chaleur et de masse sont observés (Figure 9) :

- Le transfert de chaleur consiste en un transfert externe qui se fait par convection, ou par conduction, vers la surface du produit à sécher et d'un transfert interne de chaleur qui se fait principalement par conduction de l'extérieur vers l'intérieur du produit.

- Le transfert de l'eau comprend un transfert interne qui correspond à la migration de l'eau de l'intérieur du produit vers sa surface suivie par un transfert externe qui correspond à l'élimination de la vapeur d'eau présente à la surface du produit par convection ou diffusion (Rivier et al., 2009; Zhao and Gao, 2016).

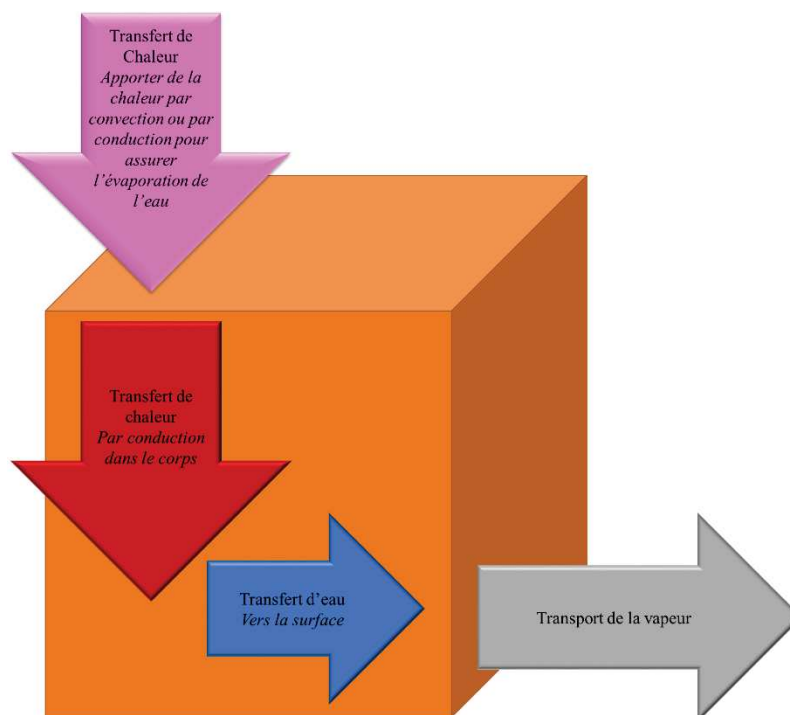


Figure 9 : Schéma représentant les transferts de chaleur et de matière lors d'un séchage par entraînement (Rivier et al., 2009).

Lors d'un séchage convectif par air chaud, il est important de maîtriser et de contrôler les variables du système de séchage tels que la température, la vitesse, l'humidité et le débit de l'air à l'intérieur de l'appareil (notamment l'homogénéité dans la répartition de ces paramètres au niveau de la totalité des produits), les conditions de circulation de l'air, les caractéristiques de conception du séchoir (courants croisés, co-courant, contre-courant, etc.) ainsi que la nature du produit et sa teneur en eau (Thu Ha Nguyen, 2016). La maîtrise de ces variables du système permettra l'obtention de produits séchés dotés de qualités organoleptiques souhaitées et appréciées.

Bien que, le séchage convectif par air chaud soit une technique largement utilisée en raison de sa simplicité et de ses avantages économiques, cette technologie présente des inconvénients. En effet, les températures élevées et la longue durée de traitement contribuent en une dégradation thermique induisant des modifications au niveau des propriétés physiques, physico-chimiques et biochimiques des produits transformés.

Avant de présenter les effets du séchage convectif par air sur les qualités des produits séchés, la cinétique de séchage généralement observée, est détaillée ci-dessous, permettant ainsi de mieux comprendre non seulement le déroulement de l'opération mais également l'origine de la dégradation thermique.

La cinétique de séchage est un suivi réalisé pour mesurer la variation de la teneur en eau (W) du produit au cours du temps (t). Trois phases sont observées sur la courbe de séchage (Figure 10) : (i) la phase transitoire de mise en température ou phase de chauffage, (ii) la phase à allure constante qui correspond à la phase de déformation et (iii) la phase à allure décroissante qui correspond à la phase de dégradation thermique.

La phase transitoire de mise en température ou phase de chauffage, est définie comme une phase d'interaction entre la surface du produit et l'air ambiant. C'est une phase assez rapide durant laquelle le flux d'air crée un transfert de chaleur externe par convection. Un faible transfert de vapeur à la surface ainsi qu'une faible élimination de la vapeur sont provoqués. Durant cette phase, la teneur en eau évolue très peu, puisque l'énergie fournie est utilisée essentiellement pour le chauffage, et un faible rétrécissement est observé à la surface du produit.

Cette première phase est suivie d'une étape plus longue qui consiste en une perte d'eau très importante, il s'agit de la phase à allure constante ou phase à température constante. Cette phase dite stationnaire est caractérisée par un équilibre entre le transfert de chaleur et le transfert de matière.

Cette phase consiste en un transfert de chaleur interne par conduction et un transfert interne d'eau de l'intérieur vers la surface du produit dû, entre autres, aux forces capillaires. En effet, durant cette phase, la température reste constante et l'énergie fournie est utilisée exclusivement pour évaporer l'eau libre présente dans le produit. Cette phase est fondamentale durant l'opération de séchage en raison de l'élimination majeure de l'eau du produit. Ce dernier étant à une température et une teneur en eau assez élevées, a un comportement viscoélastique. La grande perte en masse de ce produit, due à l'évaporation intense, induit une déformation très importante lui conférant une structure compacte emprisonnant le reste d'eau. Cette phase à allure constante est ainsi considérée comme une phase de déformation.

La phase dont la durée est la plus prolongée est la troisième phase, appelée phase à allure décroissante. Le but de cette phase est d'aboutir à une très faible teneur en eau permettant ainsi la longue conservation du produit. Cependant, afin d'évaporer les quantités d'eau emprisonnée dans la structure du produit ainsi que l'eau liée, une exposition prolongée du produit à des températures de plus en plus élevées est nécessaire. En effet, vu que l'eau est de moins en

moins libre la quantité d'énergie fournie sera utilisée en partie pour libérer cette eau, de plus en plus liée et la température du produit va augmenter considérablement. Le reste de l'énergie sera utilisé pour l'évaporation. En conséquence, une dégradation thermique est observée induisant des modifications au niveau des propriétés texturales (notamment la dureté), physico-chimiques (couleur, arômes) ainsi que nutritionnelles (vitamines, minéraux, polyphénols, etc.) des produits.

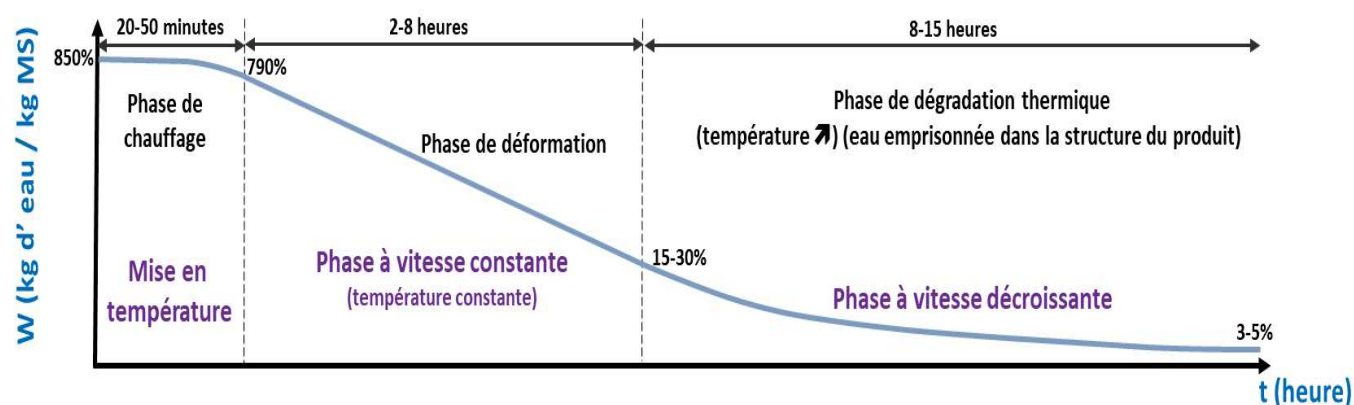


Figure 10 : Cinétique de séchage : représentation de l'évolution de la teneur en eau W en fonction du temps t , permettant de calculer les vitesses de séchage.

Les modifications observées au cours de cette phase sont explicitées ci-dessous.

Modification de la texture et de la forme

Au cours d'un séchage par air chaud, la texture et la forme des fruits sont considérablement modifiées, surtout durant la phase de déformation. En effet, en plus du phénomène de rétrécissement du produit observé durant la phase de déformation (Louka et al., 2004), la dégradation thermique qui a lieu dans la dernière phase du séchage, confère aux produits séchés une texture caoutchouteuse, parfois vitreuse.

Selon Link et al., la texture et la forme obtenues lors d'un séchage à partir d'air chaud sont responsables d'une baisse de la qualité des produits et limitent, dans certains cas, la demande en produits séchés (Link et al., 2017).

Modification de la couleur

Lors du séchage convectif par air chaud, la couleur des produits change à cause de réactions de brunissement enzymatique et non-enzymatique.

Le brunissement enzymatique désigne la réaction d'oxydation, catalysée par la polyphénoloxydases PPO, des composés phénoliques présents dans le produit en polymères colorés (bruns ou noirs). Cette réaction est surtout activée quand les fruits sont très mûrs ou

suite à une blessure subie par le fruit (chocs, épluchage, etc.). Au cours d'un brunissement enzymatique, la vitesse de réaction est maximale quand les températures atteignent 40 °C et en présence d'eau libre. D'une manière générale, afin de ralentir les réactions de brunissement enzymatique, un abaissement du pH ou un traitement thermique préalable doivent avoir lieu (blanchiment à la vapeur ou à l'eau chaude).

Le brunissement non-enzymatique, désigne la réaction de Maillard, qui consiste en une réaction chimique entre un groupement amine de composés organiques (acides aminés, protéines) et un groupement carbonyle d'un sucre réducteur (glucose, fructose). Ces réactions induisent l'apparition de pigments bruns, d'odeurs et d'arômes (associés à des aliments rôtis, grillés ou cuits) (Machiels and Istasse, 2002). Les réactions de Maillard ont certainement lieu durant la phase de dégradation thermique puisqu'elles sont favorisées à de faibles activités de l'eau, des températures élevées et de longues durées de traitements (Rivier et al., 2009).

L'apparition de pigments bruns, odeurs et arômes due aux réactions enzymatique et non enzymatique, fait que les produits séchés, plus spécifiquement les fruits, perdent en qualité et deviennent peu appétissants et moins désirés par les consommateurs.

Modification des arômes

Comme la couleur, les arômes constituent une qualité organoleptique importante. Les arômes représentent les composés volatils présents dans les fruits. Lors du séchage par air chaud, les arômes peuvent être entraînés par l'air ou dégradés à cause des hautes températures observées durant la troisième phase du séchage. En plus de la dégradation de certains arômes, l'apparition de nouveaux, tels que le caramel, peut avoir lieu lors du séchage par air chaud en raison des réactions de Maillard (Rivier et al., 2009).

Modification des qualités nutritionnelles

Le séchage convectif par air chaud affecte également les qualités nutritionnelles des fruits séchés en raison d'intenses couples temps – température. En effet, les températures élevées ainsi que les longues durées de traitement observées durant la phase de dégradation thermique induisent une destruction des vitamines, des polyphénols, des caroténoïdes, etc., (Thu Ha Nguyen, 2016). Ces modifications rendent le produit transformé moins apprécié par les consommateurs en raison de son faible apport nutritionnel.

b) Le séchage par conduction

Cette technique consiste à mettre le produit à sécher en contact avec une surface chaude, entraînant ainsi une élévation de la température du produit et de l'eau qu'il contient, induisant son évaporation. Ce mode de chauffage est destiné à être utilisé dans le cas de séchage de produits de faible épaisseur. Effectivement, un produit présentant une grande épaisseur va subir une augmentation rapide de la température à sa surface induite par l'accumulation d'énergie excessive sur cette dernière (transfert de chaleur interne beaucoup plus faible que le transfert externe). Cette accumulation d'énergie aboutit à une dégradation thermique intense à la surface du produit notamment dans le cas des produits thermosensibles.

c) L'atomisation

Le séchage par atomisation aussi appelé pulvérisation, ou *spray-drying* en anglais, s'effectue dans un appareil appelé atomiseur. Il concerne uniquement les produits pompables. Ce procédé de séchage consiste à pulvériser le produit sous forme de gouttelettes à l'intérieur de l'atomiseur afin d'augmenter considérablement la surface d'échange avec l'air chaud et sec et accélérer l'élimination de l'eau par entraînement. La température et l'humidité du courant d'air chaud changent au cours de sa trajectoire dans l'atomiseur. Bien que l'atomisation aboutisse à un séchage très rapide, ce procédé, dont l'application est limitée aux produits pulvérisables, présente un coût énergétique important et génère une pollution de l'air (Wisniewski, 2015).

d) La lyophilisation

La lyophilisation, ou *freeze-drying* en anglais, est un procédé de dessiccation à basse température qui consiste à éliminer une grande partie de l'eau par sublimation (Antal, 2015). En effet, le processus de lyophilisation implique une congélation préalable des produits et donc de l'eau libre présente, suivie par une sublimation de la glace sous vide (dans certains cas, une sublimation à pression atmosphérique peut être réalisée en utilisant un courant d'air sec très froid ou un courant d'azote).

Lors de la lyophilisation, la sublimation de l'eau se déroule en deux phases : (i) une première phase qui consiste en une sublimation, ou dessiccation primaire, c'est la phase qui permet une élimination d'environ 90% de l'eau et (ii) d'une désorption ou dessiccation secondaire qui consiste en une élimination de la majorité de l'eau restante dans le produit (moins de 10%).

La lyophilisation permet de préserver la majorité des propriétés initiales du produit telles que la forme, le goût et le contenu nutritif en évitant le rétrécissement indésirable. Les teneurs en vitamines et minéraux du produit séché sont proches de celles du produit frais (Cui et al., 2003).

Cependant, cette technique présente un coût très élevé dû à la forte consommation d'énergie et la longue durée de séchage et induit parfois un endommagement des produits en raison de la congélation, une reprise en humidité lors du stockage des produits, une photosensibilisation (pertes de pigments) et dans certains cas une perte des arômes (Gaidhani et al., 2015).

3.2.2 Les méthodes innovantes

Afin de répondre à la demande croissante des consommateurs pour des produits alimentaires séchés sans dégradation des qualités organoleptiques et nutritionnelles, les industries agro-alimentaires sont constamment à la recherche de technologies innovantes permettant d'améliorer la qualité de ces produits. Le but est donc de réduire les effets indésirables de cette transformation sur les qualités organoleptiques, nutritionnelles et sensorielles tout en assurant une bonne conservation des produits transformés. Parmi les techniques innovantes, on peut nommer le séchage par micro-ondes, par champ électrique pulsé, par la technologie du CO₂ supercritique, par rayonnements lumineux et électromagnétiques, etc. (Sagar and Suresh Kumar, 2010). Néanmoins, le coût élevé de ces techniques fait que leurs utilisations sont limitées à des produits à haute valeur ajoutée tels que les produits pharmaceutiques (Zeaiter, 2019).

Comme présenté précédemment, le problème essentiel du séchage est la dégradation thermique qui apparaît durant la troisième phase (cf. § 3.2.1) due au chauffage excessif et prolongé indispensable pour éliminer les 20 à 30% de teneur en eau résiduels. Ce traitement très agressif est imposé par la texture très compacte du produit, résultant de l'élimination de la majeure partie de son eau durant la deuxième phase du séchage ou phase de déformation (cf. § 3.2.1). Cette texture très compacte freine considérablement le transfert d'eau au sein du produit et limite son évaporation, ce qui fait que la majeure partie de l'énergie absorbée par le produit est utilisée pour le chauffage et non plus pour l'évaporation.

C'est ainsi que quelques méthodes ont été orientées vers l'introduction d'une étape de texturation au cours du séchage, juste après l'étape de compactage et avant le démarrage de l'étape de dégradation thermique intense. Parmi ces techniques, on peut citer les méthodes de texturation par augmentation rapide de température comme le *popping* ou par décompression comme le *puffing* qui est la méthode la plus ancienne, la cuisson-extrusion, la détente instantanée contrôlée (DIC) et l'intensification de vaporisation par détente vers le vide (IVDV). La texturation par *popping* consiste en une augmentation très rapide de la température d'un produit partiellement humide induisant une évaporation brusque d'une partie de l'eau du

produit engendrant son expansion. Le *puffing*, la cuisson extrusion, la DIC et l'IVDV consistent en une mise sous haute pression / haute température suivie d'une détente très rapide vers le vide avant de rejoindre la pression atmosphérique pour la DIC et l'IVDV et par une détente vers la pression atmosphérique pour le *puffing* et la cuisson extrusion.

La DIC et l'IVDV ont été conçues pour texturer les produits afin d'essayer de retrouver leurs formes et tailles initiales en améliorant la texture, les propriétés physico-chimiques et sensorielles du produit transformé. La DIC et l'IVDV sont des procédés de texturation utilisés en couplage avec le séchage par air chaud afin d'obtenir de meilleurs produits séchés. Ces technologies reposent sur une texturation des produits en augmentant leur volume, grâce à un mécanisme d'expansion, en exposant le produit à une pression de vapeur élevée, suivie d'une décompression vers le vide (Mrad et al., 2014c). Ces techniques réduisent le temps de séchage par air chaud puisque le séchage post-texturation ou, plus précisément, pendant la troisième phase, devient plus rapide grâce au mécanisme d'expansion qui permet une augmentation de la diffusivité et de l'accessibilité initiale de l'eau, induisant donc une évaporation plus facile de l'eau emprisonnée dans la structure du produit.

Toutefois, le traitement par DIC nécessite un temps assez élevé pour atteindre la pression de traitement présentant ainsi un inconvénient majeur, notamment dans le cas de produits thermosensibles, vu que le temps nécessaire pour monter en pression peut dépasser plus que 10 secondes (cas de traitement à 6 bars) et que le temps de traitement « haute pression / haute température » n'excède pas les 3 secondes. Cette prolongation considérable du temps, que subit le produit thermosensible lors de la montée en pression, peut induire des dégradations thermiques considérables.

L'IVDV a été développée dans le but de remédier à cet inconvénient. En effet, un système de mise sous pression très rapide a été inventé permettant de monter à plus de 12 bars en moins d'une seconde. Cette amélioration permet de faire subir à des produits en morceaux un traitement de type HTST (*high temperature / short time*), qui jusqu'à présent est connu et réservé pour une application sur produits liquides. Cette maîtrise du traitement sous haute pression/haute température, en créneaux, nous permet d'expanser des produits thermiquement très sensibles avant de déclencher des réactions de dégradation qui nécessitent souvent une certaine énergie d'activation (Abi-Khattar et al., 2020).

L'IVDV vise à améliorer les propriétés physiques des produits (texture, forme et couleur) ainsi qu'à conserver les qualités nutritionnelles (Mrad et al., 2015, 2014c) tout en assurant une décontamination microbienne.

Le chapitre suivant développe spécifiquement ce procédé mis en œuvre dans notre étude.

3.3. La technique de texturation par Intensification de la Vaporisation par Détente vers le Vide (IVDV)

3.3.1 L'équipement IVDV

Le réacteur de traitement IVDV est composé de quatre éléments principaux.

Le schéma représentatif du réacteur est présenté à la figure 11 (Abi-Khattar et al., 2020; Nader and Louka, 2018) :

- A. Une chambre de traitement de volume interne de 12 L dans laquelle la pression de vapeur saturante peut atteindre 15.10^5 Pa,
- B. Un réservoir sous vide dont le volume est 60 fois plus grand que celui de la chambre de traitement relié à (a) un sas d'évacuation de l'eau condensée dans le réservoir de vide et (b) une pompe à vide. Le réservoir sous vide (III) est relié à la chambre de traitement (I) par (c) une vanne pneumatique de décompression rapide (100 mm de diamètre). Elle permet une ouverture instantanée assurant une décompression rapide vers un vide (~ 100 Pa) en moins que $1/50^{\text{ème}}$ de seconde,
- C. Une pompe à vide,
- D. Un système de génération rapide de vapeur reliant la chambre de traitement au réservoir tampon de vapeur (II) et permettant une compression rapide de 12.10^5 Pa en moins d'une seconde,
- E. Un système d'augmentation de la pression à ultra-vitesse.

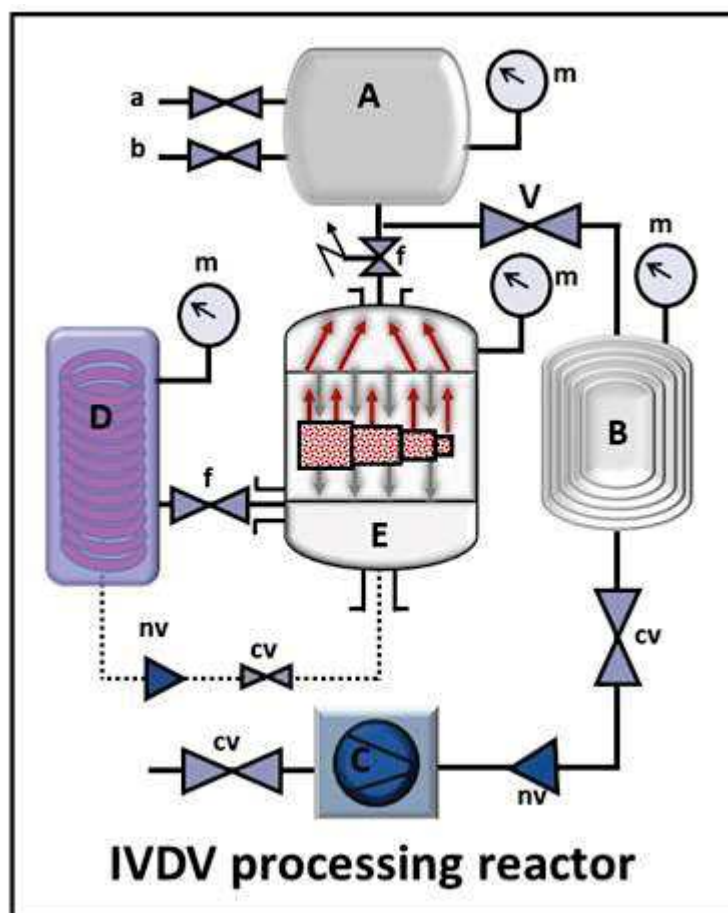


Figure 11 : Schéma du réacteur de traitement IVDV (Abi-Khattar et al., 2020): (A) : chambre de traitement ; (B) : réservoir sous vide ; (C) pompe à vide ; (D) : système de génération rapide de vapeur ; (E) : système d'augmentation de la pression à ultra-vitesse ; (a) : vanne d'injection d'air ambiant ; (b) : vanne de sortie ; (f) : vanne d'entrée de la vapeur ; (m) : manomètre ; (V) : vanne pneumatique de décompression rapide ; cv : valve de connexion ; nv : valve de non-retour.

3.3.2 Le processus d'expansion par IVDV

Le procédé IVDV se base sur un traitement thermomécanique composé de quatre étapes principales qui sont illustrées dans la figure 12.

Étape 1 : Instauration d'un vide initial

Les produits humides sont placés dans la chambre de traitement et sont soumis à une décompression vers le vide (chute de pression allant de la pression atmosphérique à la pression du vide) pendant 2 à 3 secondes. Cette décompression vers le vide, facilite la diffusion de la vapeur et accélère le chauffage du produit (Nader and Louka, 2018).

Étape 2 : Injection de la vapeur

Durant cette étape, une augmentation rapide de la pression (en moins d'une seconde avec un $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ supérieur à 12.10^5 Pa/s) est activée par le système de production de vapeur (Abi-Khattar et al., 2020; Mrad et al., 2014b; Nader and Louka, 2018).

Étape 3 : Séjour sous haute pression haute température (vapeur saturante)

Le produit subit ensuite un traitement à haute pression de vapeur "P" (pouvant atteindre 15.10^5 Pa) durant une courte durée allant de 1 à 200 s. Ce temps est nécessaire pour une acquisition des caractéristiques rhéologiques et de l'équilibre thermique du produit permettant son expansion.

Étape 4 : Détente instantanée vers le vide

Cette étape correspond à une détente rapide vers le vide en moins de $1/50^{\text{ème}}$ de seconde induisant un phénomène d'auto-vaporisation partielle de l'eau, un refroidissement rapide et une expansion maîtrisée du produit traité.

Étape 4 : Douche d'air froid

Durant cette étape, le produit est maintenu sous vide et une injection d'air atmosphérique est assurée à travers un système de douche permettant un refroidissement encore plus intense (la température au cœur du produit peut atteindre les 6 °C) induisant un arrêt de tous les phénomènes de dégradation thermique, suivie par un retour à la pression atmosphérique (fermeture de la vanne de connexion avec le réservoir de vide permettant à la pression dans la chambre de traitement de rejoindre la pression atmosphérique) (Louka, 2006).

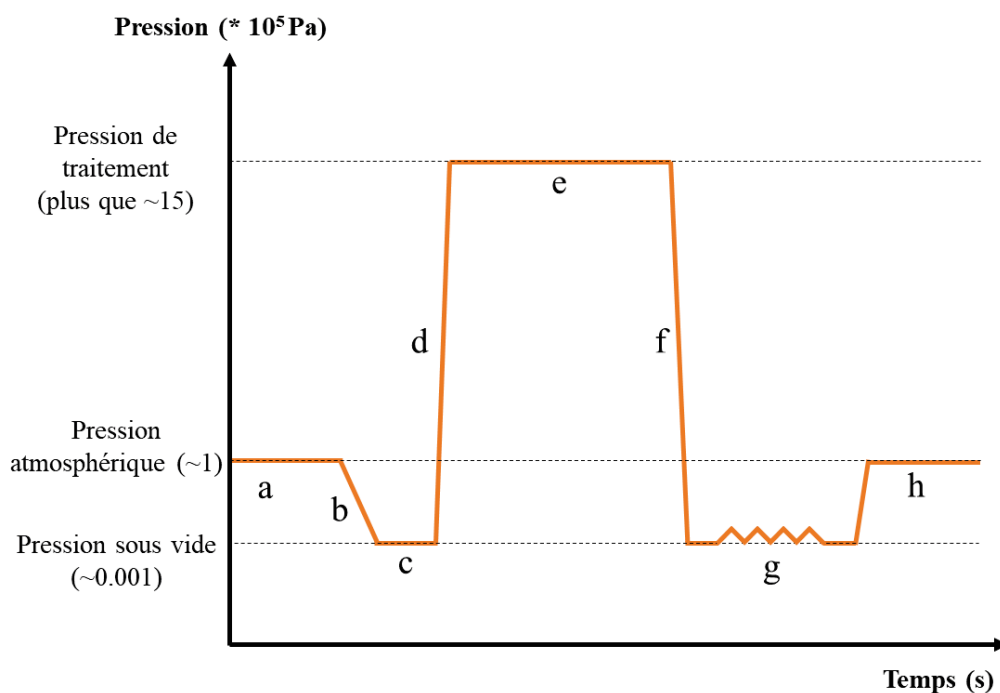


Figure 12 : Le profil pression-temps du cycle de traitement par IVDV ; a: échantillon dans la chambre de traitement à pression atmosphérique; b: décompression vers le vide dans la chambre de traitement ($\sim 0,01$ s) ; c: séjour sous vide pendant quelques secondes ; d: montée ultra rapide en pression de vapeur (avec un $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ supérieur à 12.10^5 Pa/s) pour atteindre la pression P de traitement ; e: temps de traitement sous haute pression et haute température; f : phase de détente ($< 0,02$ s); g: séjour sous vide de 2 à 3 s suivi d'une douche d'air de quelques secondes ; h: retour à la pression atmosphérique dans la chambre de traitement et récupération du produit.

3.3.3 Cinétique de séchage suite à un traitement par IVDV

Nous avons présenté dans la section 3.2.1 une cinétique de séchage convectif par air chaud qui se décompose en trois parties ; (i) la phase de mise en température qui consiste en une faible élimination de la vapeur d'eau et dans laquelle le produit ne perd pas beaucoup en forme, (ii) la phase de déformation qui consiste en une élimination intense de l'eau du produit et rapide de la vapeur d'eau et dans laquelle le produit acquiert une structure compacte emprisonnant une certaine quantité d'eau et (iii) la phase de dégradation thermique qui repose sur l'élimination de l'eau liée ou emprisonnée dans la structure compacte du produit. Durant cette dernière phase, comme présenté précédemment, une dégradation accrue des qualités du produit a lieu en raison de l'augmentation de la température et de la longue durée.

Vu que le traitement par IVDV repose sur une augmentation du volume du produit par expansion permettant une évaporation plus facile de l'eau emprisonnée et donc une réduction

du temps du séchage, l'étape de texturisation par IVDV se réalise généralement après la phase de déformation. La figure 13 présente une comparaison de cinétique de séchage par air chaud seul et suite à un traitement par IVDV.

Ce procédé, comme déjà mentionné, permet une expansion des produits donc une augmentation de leur volume, l'eau devient plus libre, moins emprisonnée dans la structure du produit et donc capable de s'échapper à travers les cavités formées, facilitant ainsi l'évaporation. Ce procédé de texturation réduit la durée de séchage pendant la troisième phase et limite l'augmentation de la température du produit. En effet, suite à un traitement par IVDV, l'énergie apportée par l'air, sera à nouveau utilisée majoritairement pour l'évaporation et non pas pour le chauffage, limitant ainsi la dégradation thermique et permettant l'obtention d'un produit de forme, texture et couleur appréciées par les consommateurs, tout en préservant leur qualité nutritionnelle et assurant une décontamination microbienne (Debs-Louka, 2000).

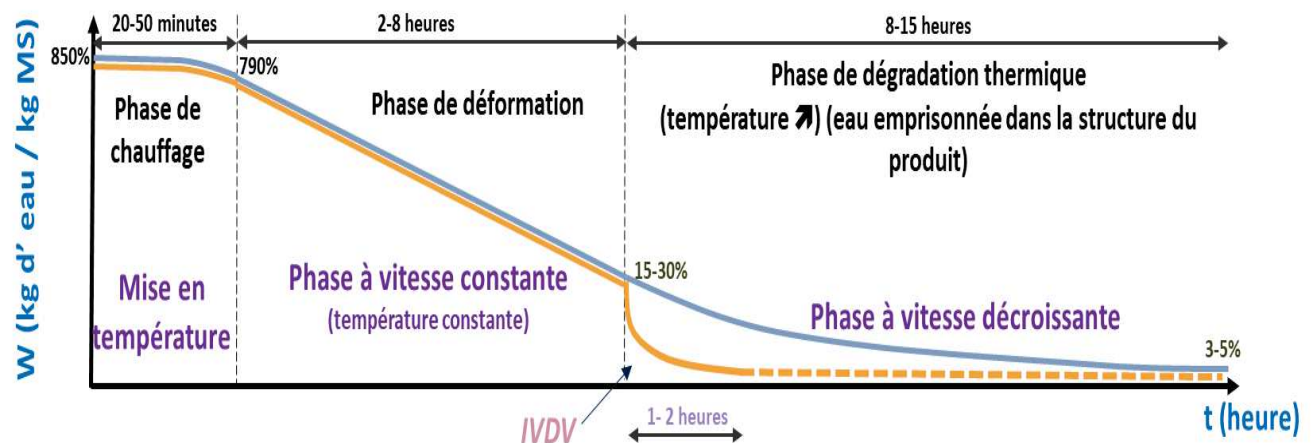


Figure 13 : Représentation de la cinétique de séchage ; La courbe verte représente une courbe typique du séchage convectif et la courbe en orange représente une courbe de séchage après texturation par IVDV.

3.3.4 Les avantages de l'IVDV

L'IVDV est un procédé présentant plusieurs avantages :

1. Réduire le temps de séchage par air chaud,
2. Éviter la dégradation thermique des produits séchés,
3. Augmenter la capacité et vitesse de réhydratation des produits séchés,
4. Améliorer la texture et forme des produits séchés,
5. Conserver la couleur des produits finis,
6. Réduire le coût de l'opération du séchage,

7. Assurer une décontamination microbienne (explosion des bactéries sous leurs formes végétative et sporulée)

3.3.5 Les applications de l'IVDV

Le procédé IVDV a été utilisé principalement pour la texturation de différents produits alimentaires tels que les arachides partiellement dégraissées (Nader et al., 2017; Nader and Louka, 2018), les pois chiches et différents types de maïs (avec une amélioration de la teneur en polyphénols et de la couleur) (Mrad et al., 2015, 2014c), les graines de maïs violet (Mrad et al., 2014a, 2014b) mais aussi pour une amélioration de l'extraction des polyphénols des feuilles d'olivier (Abi-Khattar et al., 2020). Néanmoins, jusqu'à ce jour, aucune application n'a été réalisée sur les mangues.

Chapitre 2. Matériels et Méthodes

CHAPITRE 2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans ces travaux de thèse, deux produits transformés de la mangue ont été étudiés : **les purées de mangue et les mangues séchées expansées**. Afin de faciliter la lecture de ce chapitre, deux grandes parties leur seront consacrées.

1. Première partie : *Les purées de mangues*

1.1. Matière première

Deux variétés de mangues ont été choisies pour réaliser les essais de cette première partie :

- (i) Cinquante mangues vertes de la variété Kent (*Mangifera indica* L., cv. Kent) provenant du Pérou par bateau, ont été achetées sur un marché local (Georges Helfer SA, Plan d'Orgon, France) et analysées dans les locaux du CIRAD à Montpellier. *Les preuves de concept ont été effectuées sur ce lot de cinquante mangues.*
- (ii) Cinquante mangues vertes de la variété Cogshall (*Mangifera indica* L., cv. Cogshall) de la Réunion, dont un premier lot de huit mangues analysées en 2019 et un deuxième lot de quarante-deux mangues analysées en 2021, dans les locaux du CIRAD à l'Île de la Réunion. *Les analyses complémentaires ont été effectuées sur ces deux lots de mangues afin de vérifier que les stratégies expérimentales proposées sont adaptées à de nouveaux lots et/ou variétés de mangues et évaluer la généricité des outils proposés.*

Les cinquante mangues vertes de la variété Kent (*Mangifera indica* L., cv. Kent, Pérou), préalablement conservées à 10 °C pendant 10 jours pour ralentir la maturation, ont été stockées entre un et vingt-cinq jours, dans une chambre climactérique (KBF 720 E2.1, Binder GmbH, Tuttlingen, Germany) avec des conditions contrôlées de température et d'hygrométrie (18 °C, 80 % HR). Les analyses ont été effectuées sur 20 jours différents au cours de la maturation sur une ou deux mangues (2 mangues pour 7 jours différents de maturation).

Les huit et quarante-deux mangues vertes de la variété Cogshall (*Mangifera indica* L., cv. Cogshall, Réunion), provenant directement des champs, ont été stockées treize jours et onze

jours, respectivement, dans un incubateur dans les mêmes conditions de température et d'hygrométrie utilisées pour les mangues de la variété Kent (18 °C, 80 % HR). Les analyses ont été effectuées sur 8 jours différents pour le premier lot (8 mangues) et 11 jours différents pour le deuxième lot (42 mangues) au cours de la maturation.

Le jour des analyses, chaque mangue (Kent ou Cogshall) a été plongée dans de l'eau chlorée pendant 5 minutes à température ambiante (200 ppm d'hypochlorite de sodium, Chem-Lab, Zedelgem, Belgique) et a été essuyée avec de l'éthanol à 70 % (Honeywell, Riedel-de Haën, absolu, ≥ 99.9 , Charlotte, Caroline du Nord, États-Unis) pour désinfecter la peau des fruits et enlever la couche de latex.

Chaque mangue a été transformée séparément en purée et toutes les mesures ont été effectuées sur le même fruit et sa purée.

1.2. Caractérisation des mangues

1.2.1 Densité

La densité des fruits est l'une des mesures physiques qui pourrait constituer un critère prédictif pertinent de la qualité des fruits sans les endommager (Hor et al., 2020). Elle est calculée selon le principe d'Archimède en mesurant la masse de fruits frais dans l'air et dans l'eau. Les mesures de densité ont été réalisées sur chaque mangue au cours de la maturation. Le fruit est placé dans un panier suspendu à la balance et totalement immergé dans l'eau. La densité de chaque mangue a été calculée selon l'équation suivante (Eq. 3) :

$$d_{mangue} = \frac{m_{mangue}}{(m_{mangue} - m'_{mangue})} \quad \text{Eq. 3}$$

Avec d la densité (sans dimension), m la masse dans l'air (kg) et m' la masse dans l'eau (kg).

1.2.2 Caractérisation texturale

La fermeté d'un fruit est une caractéristique étroitement liée aux propriétés structurelle et mécanique du fruit, elle est considérée comme un indicateur fiable pour l'évaluation des stades de maturité et de maturation. En effet, l'évaluation de la fermeté permet de mettre en évidence le ramollissement des fruits qui apparaît au cours de la maturation.

La fermeté des fruits est couramment évaluée au travers de mesures texturales destructives telles que la pénétrométrie (Valente et al., 2019) ou de mesures texturales non-destructives

généralement réalisées à l'aide de duromètres manuels ou statiques (Jarimopas and Kitthawee, 2007; Valente et al., 2011; Valero et al., 2007).

Dans ce travail, deux mesures de texture ont été mises au point pour l'évaluation de la fermeté des mangues : une mesure destructive conventionnelle par pénétrométrie et une mesure non-destructive par compression. Les deux méthodes ont été effectuées à l'aide d'un texturomètre (TA-XT2, Stable micro Systems, Londres, Royaume-Uni) équipé d'un capteur de force de 5 kg et du logiciel Exponent (version 5.1.1.0) pour l'acquisition des données.

Texture non – destructive par compression

Le test de compression a été proposé pour simuler la perception tactile de l'opérateur lors du tri des mangues en fonction de leur fermeté. Comme le potentiel hydrique sur le fruit peut varier selon sa position sur l'arbre et son exposition au soleil, ce test a été effectué sur les deux faces de chaque mangue. Les mesures ont été réalisées sur trois points différents de chaque face des mangues en utilisant une sonde sphérique de 2 cm de diamètre, à une vitesse de 1 mm.s^{-1} pour atteindre une force de compression maximale de 10 N (Figure 14). La force maximale a été choisie afin d'éviter l'endommagement de la structure du fruit et donc de proposer un test de texture non-destructif. Les courbes d'évolution de la force en fonction de la distance ont été enregistrées et les distances parcourues par la sonde pour atteindre une force de 5 ou 10 N (D_{5N} ou D_{10N}) ont été identifiées comme les paramètres pertinents permettant de décrire la fermeté des mangues.

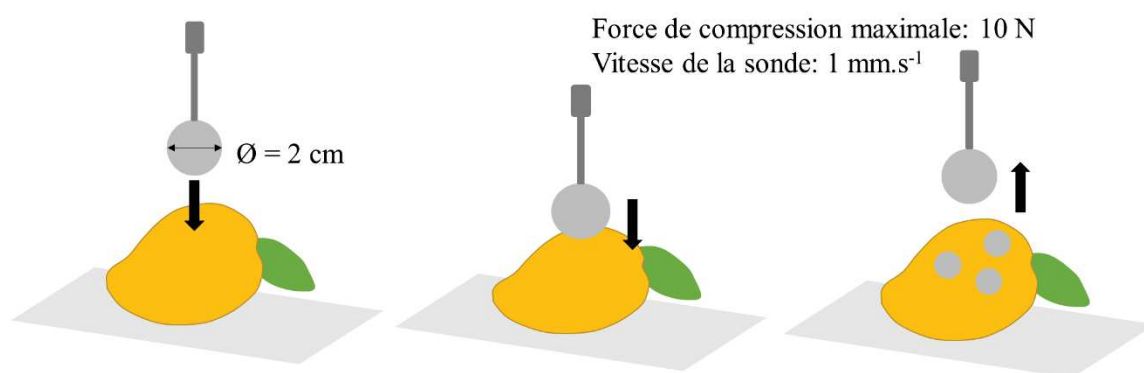


Figure 14 : Représentation du test de compression effectué sur une face de la mangue.

L'évolution de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5 et 10 N, lors du test de compression réalisé sur les deux faces de la mangue, a montré des résultats

similaires avec des corrélations linéaires présentant un $R^2 > 0,99$ (Figure 15). Ainsi, compte tenu de ces observations, les résultats concernant le test non-destructif de compression ne seront représentés par la suite que par la distance à 5N (D_{5N}) sur une seule face des mangues.

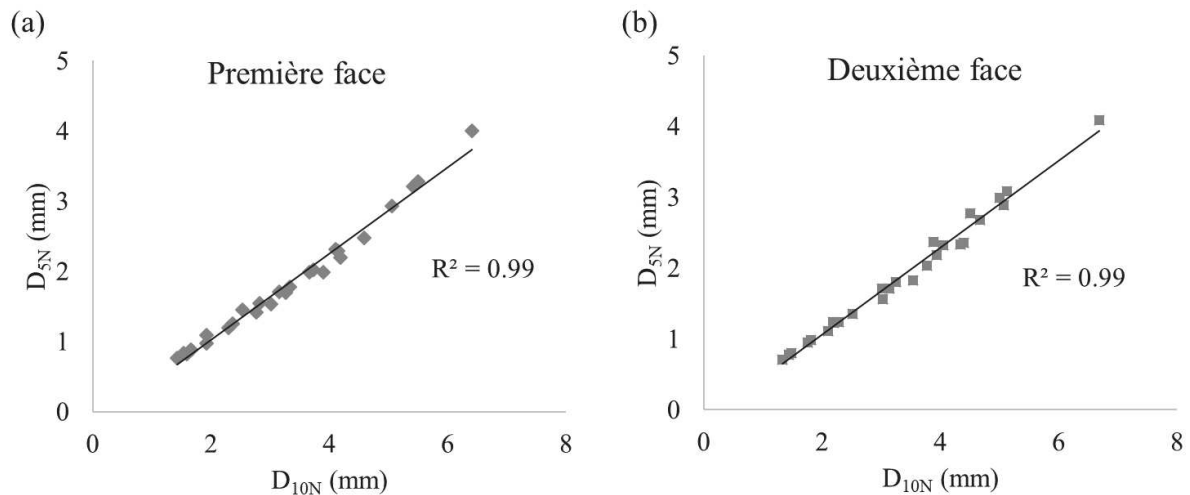


Figure 15 : Évolution de la distance parcourue par la sonde pour atteindre 5 N (D_{5N}) en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre 10 N (D_{10N}) pour (a) la première face et (b) la deuxième face de la mangue.

Texture destructive par pénétrométrie

Pour évaluer la fermeté de la pulpe de mangues par une mesure destructive conventionnelle, un test de pénétrométrie a été réalisé. Des tranches de 15 mm d'épaisseur ont été découpées, des deux faces de la mangue, à l'aide d'une trancheuse à jambon électrique (Trancheuse électrique lame 19 cm – DOMO DO1950S, 100 W, Belgique). Les mesures ont été réalisées sur trois points différents de la partie interne des tranches à l'aide d'une sonde cylindrique en acier inoxydable de 5 mm de diamètre, à une vitesse de 1 mm.s^{-1} pour atteindre une distance maximale de 5 mm (Figure 16). La fermeté a été évaluée par la moyenne des valeurs de forces maximales ($F_{\max}$) (force nécessaire pour pénétrer les tranches de mangue de 5 mm) obtenues à partir des courbes d'évolution de la force en fonction de la distance.

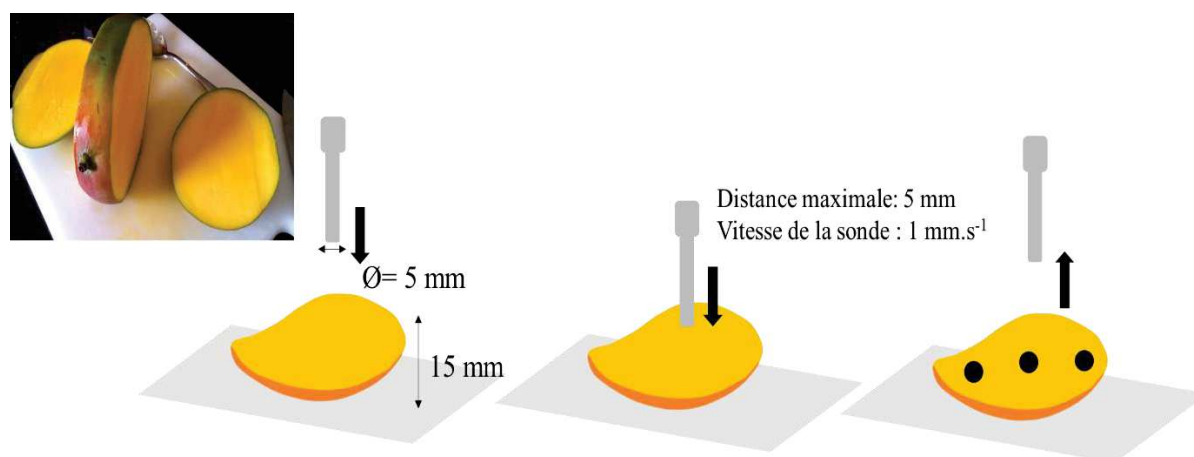


Figure 16 : Représentation du test de pénétrométrie effectué sur la partie interne d'une tranche de mangue de 15 mm d'épaisseur.

1.2.3 Caractérisation rhéologique des tranches de mangues

La rhéologie étudie les déformations et l'écoulement d'un matériau donné sous l'effet des contraintes qui lui sont appliquées. Dans le domaine alimentaire, cette science est utilisée pour évaluer les propriétés des matrices alimentaires visqueuses (liquides), viscoélastiques (semi-solides, solides mous) et élastiques (solides) en analysant les effets de sollicitations mécaniques imposées sur le comportement à l'écoulement ou sur les réponses viscoélastiques ou sur le comportement solide de la matrice alimentaire.

Dans ce travail, des mesures rhéologiques en régime dynamique ont été effectuées sur des tranches de mangues pour évaluer l'évolution du comportement solide de la pulpe de mangue en relation avec la perte de fermeté du fruit pendant la maturation.

Les mesures rhéologiques oscillatoires en faible amplitude de déformation (SAOS, *small amplitude oscillatory shear*) ont été réalisées sur des tranches cylindriques de mangue de 2 mm d'épaisseur et de 35 mm de diamètre. Les tranches de mangues ont été découpées de chaque face à l'aide de la trancheuse électrique et les cylindres ont été obtenus à l'aide d'un emporte-pièce métallique de 35 mm de diamètre.

Les mesures rhéologiques ont été effectuées en utilisant un rhéomètre Haake Mars 60 (Thermofisher, Waltham, Massachusetts, USA) équipé d'un module de mesure à géométrie plans-parallèles striés de 35 mm de diamètre (P35/Ti/SE, Ø=35mm) pour éviter le glissement de l'échantillon lors de la mesure et du logiciel "RheoWin" (version 4.82.0002) pour l'acquisition des données. Les mesures ont été réalisées à une température de $25 \pm 0,1$ °C contrôlée par un système Peltier. Les modules de stockage G' et de perte G'' ont été mesurés à

une fréquence constante de 1 Hz sous une déformation d'amplitude variant de 0,01 à 1 % et en appliquant une force normale contrôlée de 4 N. Les valeurs du module de stockage G' (Pa) à 0,1 % de déformation ont été choisies comme indicateur rhéologique reflétant le comportement solide des tranches de mangue. Les mesures ont été effectuées sur quatre tranches cylindriques (2 cylindres de chaque face).

1.3. Transformation des mangues en purée

Dans cette étude, les mangues ont été broyées en utilisant les mêmes conditions de broyage standardisées. La standardisation du broyage, qui a fait objet d'une étude exploratoire, avait pour but de minimiser l'effet du traitement mécanique pour une meilleure évaluation de l'effet de la maturation des mangues sur les propriétés physiques des purées.

Chaque mangue a été pelée manuellement, le noyau a été enlevé et la pulpe a été découpée en petits morceaux d'environ 1 cm³. Les morceaux de pulpes ont été ensuite broyés à 25°C à l'aide d'un Thermomix (Vorwerk, Typ 31-1, Wuppertal, Allemagne) selon les conditions de broyage standardisées (vitesse de 1 000 tours/minute pendant 1 min (12 000 J), 7 000 tours/minute pendant 1 min (24 000 J) et 10 000 tours/minute pendant 2 min (60 000 J)). Après broyage, une quantité de 180 g environ de purée, a été stockée à 4°C avant les analyses.

1.4. Caractérisation des purées

1.4.1 Analyses physico-chimiques conventionnelles

L'acidité titrable (AT), le pH, l'extrait sec soluble, la matière sèche et la couleur ont été mesurés pour évaluer les caractéristiques physico-chimiques des purées au cours de la maturation des mangues. Ces mesures simples et rapides évaluent efficacement les changements biochimiques qui peuvent avoir lieu au cours de la maturation des mangues.

Acidité titrable et pH

Les acides citrique et malique sont les principaux acides organiques présents dans la mangue contribuant à l'acidité et la saveur du fruit. L'acidité titrable est la mesure de la concentration d'acide totale, exprimée en grammes d'acide citrique (acide organique majoritaire de la mangue) par 100 g de purées de mangues. Le pH et l'acidité titrable ont été mesurés à l'aide d'un titrateur automatique Titroline (Schott Schweiz AG, St. Gallen, Suisse) étalonné préalablement avec deux solutions tampons de pH 4 et 7. Le pH initial a été mesuré en début

de titration et l'acidité titrable a été évaluée par titrage à la soude (NaOH) à 0,025 N jusqu'à atteindre un pH de 8,2. L'acidité titrable des purées de mangues a été calculée selon l'équation 4 :

$$AT = \frac{0.025 \times V_{NaOH} \times MM_{acide\ citrique}}{n_{acide\ citrique} \times V_{purée}} \quad \text{Eq.4}$$

Avec AT l'acidité titrable (g acide citrique/100 g de purée), V_{NaOH} le volume de NaOH versé (mL) pour atteindre un pH de 8,2, $MM_{acide\ citrique}$ la masse molaire de l'acide citrique (g.mol^{-1}), $n_{acide\ citrique}$ le nombre de fonctions acide de l'acide citrique (acide tricarboxylique ; $n=3$) (/) et $V_{purée}$ le volume du purée utilisé (mL).

L'extrait sec soluble

L'extrait sec soluble d'une purée de fruits, représente la matière sèche des composés solubles tels que le sucre, les acides organiques, les minéraux, etc. Étant donné que le sucre est le composé soluble majoritaire des mangues en comparaison aux autres composés, l'extrait sec soluble des purées de mangue a été déterminé par réfractométrie en mesurant le degré Brix ($^{\circ}\text{Bx}$), correspondant à la masse de sucre présente dans 100 g de purée. Les mesures du degré Brix ont été réalisées à température ambiante sur 1g de purée de mangues avec un réfractomètre Abbe classique (Atago, Tokyo, Japon) préalablement étalonné avec l'eau distillée.

La matière sèche totale

La matière sèche des purées de mangues représente le résidu sec obtenu suite à l'élimination de l'eau. La matière sèche des purées de mangue, exprimée en g/100 g de purée, a été déterminée par un séchage de 3 g de purée bien homogénéisée, dans une étuve sous vide à 70°C pendant 24h afin de minimiser la réaction de Maillard pouvant biaiser cette mesure.

La couleur

La couleur représente un indicateur visuel de la qualité des produits frais ou transformés. Elle est généralement mesurée à l'aide de colorimètres, instruments conçus pour quantifier la couleur en termes de perception humaine et les données sont exprimées dans le système $L^*a^*b^*$. La couleur des purées de mangues a été déterminée à l'aide d'un colorimètre Minolta CR-300 (Konica Minolta Sensing, Inc, Ramsey, New Jersey, USA) selon le système de couleur CIELAB (L^* , a^* , b^*) avec L^* représentant la luminosité variant de 0 à 100, (0 représentant le

noir et 100 le blanc), a^* représentant la variation du vert (-) au rouge (+) et le b^* reflétant la variation du bleu (-) au jaune (+).

Toutes les analyses physico-chimiques ont été effectuées à 25°C avec trois répétitions et les valeurs moyennes ont été utilisées.

1.4.2 Caractérisation des solides insolubles en suspension

Les solides insolubles en suspension représentent, dans le cas des purées de fruits, les particules insolubles de plus de 1 μm qui forment la phase dispersée. La teneur, la taille et les interactions de ces particules confèrent aux purées de fruits leurs propriétés physiques.

Ainsi, afin de mieux appréhender les changements des propriétés physiques des purées au cours de la maturation des mangues, l'énergie de cohésion des solides insolubles en suspension des purées de mangues a été déterminée à partir de mesures rhéologiques en régime dynamique. De plus, la distribution en taille des particules constituant cette fraction a été également évaluée (section 2.4.3).

Les solides insolubles en suspension des purées de mangues (SIS, g/100 g de purée) ont été récupérés en éliminant le surnageant (contenant la phase sérique riche en composés solubles) suite à une centrifugation (centrifugeuse Eppendorf modèle 5810 R, Hambourg, Allemagne) de 10 grammes de chaque purée avec une accélération de 18 000 g pendant 30 minutes à 25°C.

Ces conditions de centrifugation (couple accélération / temps de centrifugation), visant à séparer les solides insolubles ($>1\mu\text{m}$) de la phase dispersante, ont été déterminées à l'aide de la loi de Stokes (dans ce travail les particules sont considérées sphériques et toutes de même masse volumique) (Eq. 5) :

$$v_{sed} = \frac{2 \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times g \times (\rho_p - \rho_m)}{9 \times \mu_m} \quad \text{Eq.5}$$

Avec v_{sed} la vitesse de sédimentation des particules (m.s^{-1}), d le diamètre des particules (m), g l'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}), ρ_p et ρ_m les masses volumiques de la phase dispersée et du milieu dispersant (kg.m^{-3}), respectivement et μ_m la viscosité dynamique du milieu dispersant (Pa.s).

Des mesures rhéologiques en mode dynamique ont été réalisées sur les solides insolubles en suspension (SIS) de chaque purée de mangue. Les mesures ont été effectuées à $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ en utilisant le rhéomètre Haake Mars 60 équipé d'un module à géométrie plans-parallèles striés (P35/Ti/SE, $\varnothing=35\text{mm}$) avec un entrefer de 2 mm et du logiciel RheoWin pour l'acquisition des données. Un temps de repos de 5 minutes après le dépôt de l'échantillon a été imposé, suivi d'une variation de l'amplitude de déformation de 0,01 à 100 % à une fréquence constante de 1 Hz. Les évolutions des modules de stockage G' (Pa) et de perte G'' (Pa) en fonction de la contrainte (%) ont été enregistrées.

Afin de quantifier la force des interactions entre les solides insolubles en suspension dans les purées de mangue, l'énergie spécifique de cohésion du réseau tridimensionnel (E_c , Pa or J.m^{-3}) a été calculée à partir du module de stockage G' dans le domaine viscoélastique linéaire (LVE-R) (domaine dans lequel le G' reste constant) selon l'équation 6 (Bossard et al., 2007 ; Hammas et al., 2019 ; Megías-Alguacil, 2004).

$$E_c = \frac{1}{2} G'_{LVE-R} \cdot \gamma_c^2 \quad \text{Eq.6}$$

Avec E_c l'énergie de cohésion (Pa), G'_{LVE-R} le module de stockage (Pa) déterminé dans le domaine viscoélastique linéaire (LVE-R), et γ_c sa déformation de cisaillement critique correspondante (%).

1.4.3 Distribution en taille de particules des purées et de leurs solides insolubles en suspension

La granulométrie laser est une technique largement utilisée pour la détermination de la distribution de la taille des particules présentes dans une suspension, allant de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs millimètres. La distribution granulométrique des particules est déterminée en mesurant la variation angulaire de l'intensité de lumière diffusée, lorsqu'un échantillon de particules dispersées est traversé par un faisceau laser. Chaque particule diffuse la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille : les grosses particules diffusent la lumière à de petits angles par rapport au faisceau laser et inversement pour les petites particules. Les intensités de lumières diffusées sont captées par des photodiodes et les données relatives aux intensités en fonction de l'angle sont analysées afin de calculer la taille des particules qui ont

créé l'image de diffraction. La distribution de particules est représentée par le diamètre des sphères équivalentes, ayant le même volume que les particules analysées.

La distribution de la taille des particules de purées de mangue et de leurs solides insolubles en suspension a été déterminée par diffraction LASER en utilisant un granulomètre Mastersizer de Malvern (Mastersizer 3000, Malvern Instruments Limited, Worcestershire, UK). Ce granulomètre peut fournir, théoriquement, une distribution de taille des particules allant de 10 nm à 3500 μm . Les mesures ont été effectuées en mode humide en utilisant de l'eau distillée comme liquide de suspension. Les valeurs 1,73 et 1,33 ont été utilisées respectivement, comme indices de réfraction des particules et du liquide de la suspension, avec 0,1 l'indice d'absorption des particules (Dahdouh et al., 2016). L'échantillon a été dilué pour atteindre une obscurité de 20 %, agité à 1500 tours par minute et pompé à travers la cellule optique. Ces conditions d'agitation ont été utilisées afin de ne pas modifier la distribution initiale de la taille des particules de purée. Pour chaque mesure, la distribution de taille de particules (densité volumique (%)) en fonction du diamètre des particules) a été obtenue et les diamètres statistiques, D_{10} , D_{50} et D_{90} (D_x indique une taille de particules pour laquelle x% des particules sont inférieures à cette taille) ainsi que les diamètres moyens surfacique $D [3;2]$ (diamètre moyen de Sauter) et volumique $D [4;3]$ (diamètre moyen de Brouckere) ont été déduits (Dahdouh et al., 2015).

Le diamètre surfacique moyen, $D [3;2]$ indique le diamètre d'une sphère qui a le même rapport volume/surface que le rapport volume/surface calculé de toutes les particules (Eq.7) :

$$D [3;2] = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2} \quad \text{Eq.7}$$

Avec n_i le nombre de particules de diamètre d_i .

Le diamètre volumique moyen $D [4;3]$ indique le diamètre de la sphère dont le volume est égal à la moyenne des volumes de toutes les particules de l'échantillon (Eq.8) :

$$D [4;3] = \frac{\sum_i n_i d_i^4}{\sum_i n_i d_i^3} \quad \text{Eq.8}$$

Avec n_i le nombre de particules de diamètre d_i .

Les résultats obtenus sur les purées et les solides insolubles en suspension ont fourni des distributions de taille de particules identiques, les particules de très petite taille n'étant pas détectables avec cette technique. Par conséquent, les résultats présentés dans ce

travail concernant principalement la distribution de la taille des particules de solides insolubles en suspension des purées dont la taille est supérieure à $1\mu\text{m}$.

1.4.4 Caractérisation rhéologique conventionnelle des purées

Le comportement à l'écoulement ainsi que les propriétés viscoélastiques (propriétés de gels) des purées de mangue ont été évalués au travers de deux mesures rhéologiques conventionnelles (mode écoulement et mode dynamique), en utilisant un rhéomètre Physica MCR301 (Anton Paar GmbH, Graz, Autriche) équipé d'une géométrie de type ailette (géométrie Anton Paar : agitateurs et tiges, tiges Krebs (ASTM D562) – (ST22- 6V- 16 : vanne à six ailettes de diamètre 22 mm)) et du logiciel "Start Rheoplus" (version RHEOPLUS/32 V3.40) pour l'acquisition des données rhéologiques.

Choix de la géométrie, du pré-cisaillement et du temps de repos

La géométrie choisie pour analyser les propriétés d'écoulement et les propriétés viscoélastiques des purées de mangue doit limiter la déstructuration des purées lors de l'insertion du système de mesure. Les deux géométries les plus utilisées pour les mesures rhéologiques des suspensions de fruits sont la géométrie de type ailette et la géométrie de couette (géométrie Anton Paar : systèmes à cylindre concentrique (DIN EN ISO 3219 et DIN 53019) (cf. état de l'art § 2.2.3).

La taille de l'entrefer ($R_e - R_i$) (Figure 17) lors de l'utilisation des deux géométries doit être prise en compte afin de ne pas perturber l'écoulement du matériau en engendrant un confinement ($R_e - R_i$ environ 10 fois le diamètre des plus grosses particules présentes dans la suspension (cf. état de l'art § 2.2.3)). Les deux géométries testées étaient (i) une géométrie à six ailettes (ST22- 6V- 16, diamètre 22 mm avec un godet fixe d'un diamètre de 28,7 mm ; entrefer = 3,35 mm) et (ii) les cylindres coaxiaux (B-CC18.92-40/118, diamètre 18,92 mm ($2R_i$) avec un godet fixe d'un diamètre de 28,7 mm ($2R_e$) ; entrefer = 4,89 mm).

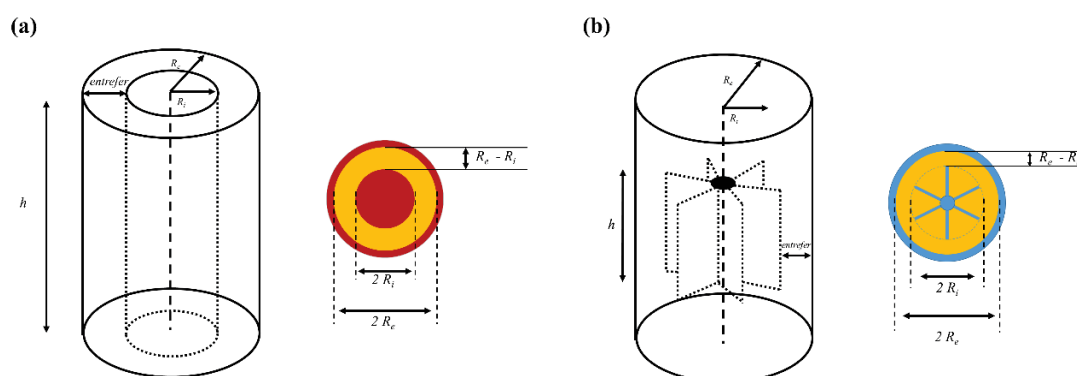


Figure 17 : Entrefers (a) de la géométrie des cylindres coaxiaux (B-CC18.92-40/118, diamètre 18,92 mm) ($h = 16$ mm, $R_i = 9,46$ mm, $R_e = 14,35$ mm et entrefer = 4,89 mm) et (b) de la géométrie à 6 ailettes (ST22- 6V- 16, diamètre de 22 mm) ($h = 16$ mm, $R_i = 11$ mm, $R_e = 14,35$ mm et entrefer = 3,35 mm), utilisées pour les mesures rhéologiques conventionnelles en écoulement et en dynamique.

Afin de minimiser la déstructuration du produit lors de la mise en place du système de mesure, un pré-cisaillement et un temps de repos ont été appliqués. L'évolution du module de stockage G' , lors de la mise en place des deux géométries sur la même purée de mangue, a été enregistrée pendant un temps de repos de 10 min avec une déformation de 0,1% et une fréquence de 10 rad/s. Après ce temps de repos, G' a été évalué par un balayage en amplitude ($\gamma = 0,015 - 150\%$, $\omega = 10$ rad/s), suivi d'un cisaillement constant pendant 2 min à 50 s^{-1} . Le module de stockage a été également évalué après le second temps de repos de 10 min ($\gamma = 0,1 \%$ et $\omega = 10$ rad/s). Comme présenté dans la figure 18, dans le cas de la géométrie à 6 ailettes, le plateau du module de stockage G' semble être atteint plus rapidement que dans le cas des cylindres coaxiaux. De plus, toujours dans le cas de la géométrie à 6 ailettes, le temps de repos de 10 min a été suffisant pour que la purée atteigne une valeur quasi constante du G' . Nous avons également constaté que la purée se restructure après une phase de cisaillement et que la valeur du G' , après 10 min de repos, est approximativement la même que celle observée avant le cisaillement lors de l'utilisation de la géométrie à 6 ailettes.

Sur la base de ces observations, nous avons utilisé dans ce travail une géométrie à 6 ailettes (ST22- 6V- 16, rayon de 22 mm) (Figure 17 (b)) car elle permet une meilleure restructuration des purées en incluant dans notre méthode de mesure une étape de pré-cisaillement à 50 s^{-1} pendant 1 min, suivie d'une étape de repos (10 min), afin de réduire l'impact de l'insertion de la géométrie sur les propriétés rhéologiques des purées de mangue.

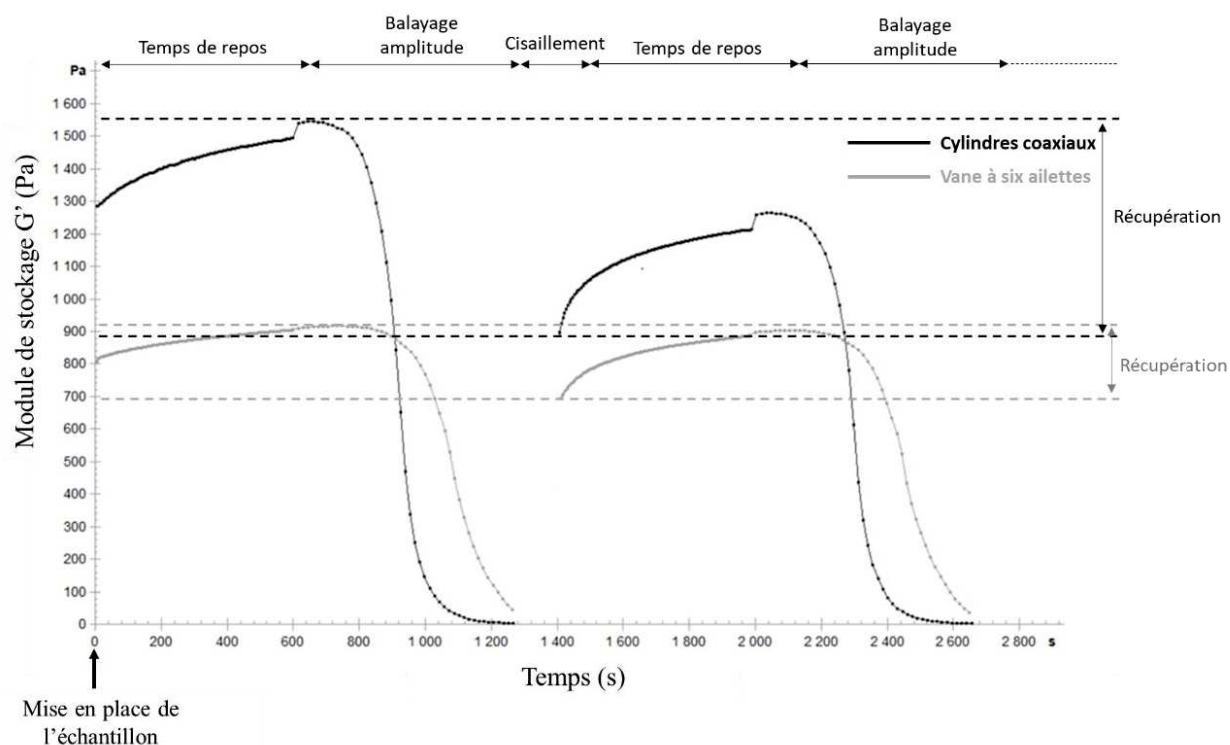


Figure 18 : Effet du pré-cisaillement et de temps repos sur les propriétés rhéologiques des purées de mangue lors de l'insertion de deux géométries. En noir et gris sont représentés les résultats obtenus pour la purée de mangue en utilisant les cylindres coaxiaux et la géométrie à 6 ailettes, respectivement.

Les deux modes de mesure adoptés (écoulement et dynamique) sont décrits ci-dessous.

Mesures en mode écoulement

L'évolution de la viscosité dynamique μ (Pa.s) des purées de mangues a été déterminée à $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ en utilisant un système à effet Peltier relié à un réfrigérant (Viscotherm VT2, Anton Paar GmbH, Graz, Autriche) et en imposant une augmentation logarithmique de la vitesse de cisaillement allant de $0,1$ à 500 s^{-1} . Les résultats de chaque purée de mangue ont été analysés en exprimant la viscosité dynamique μ (Pa.s), en fonction de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ (s^{-1}).

Mesures en mode dynamique : Balayage oscillatoire de fréquence

Les propriétés de gels des purées de mangue ont été étudiées au travers d'un balayage oscillatoire en fréquences. Les mesures ont été effectuées sur les purées de mangues dans la région viscoélastique linéaire afin d'évaluer la dépendance du comportement viscoélastique des purées de mangue à la fréquence. Le domaine viscoélastique linéaire a été préalablement déterminé lors d'un balayage en amplitude à une fréquence constante de 1 Hz . Les mesures ont été réalisées à une déformation constante de $0,1\%$, tandis que la fréquence (f) a varié de $0,1$ à

10 rad/s à une température régulée à $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ en utilisant le système à effet Peltier relié à un réfrigérant. Les évolutions des modules de stockage G' (Pa) et de perte G'' (Pa) en fonction de la fréquence (f , rad/s) ont été enregistrées.

Afin d'étudier la dépendance des modules de stockage G' et de perte G'' à la fréquence une modélisation avec une loi de puissance (Eq. 9 et 10) comme décrit par Xu et al. 2017, et Albano et al. 2014, a été effectuée :

$$G' = A' \cdot f^{n'} \quad \text{Eq.9}$$

$$G'' = A'' \cdot f^{n''} \quad \text{Eq.10}$$

Avec A' et A'' (Pa.s^n), les constantes liées à la résistance du gel qui reflètent respectivement les propriétés élastiques et visqueuses des purées, n' et n'' , les indices de relaxation qui fournissent des informations concernant la dépendance à la fréquence des modules de stockage et de perte, et f la fréquence (rad/s).

Les mesures rhéologiques en écoulement et en dynamique (fréquence) ont été effectuées au moins trois fois pour garantir la cohérence des résultats.

1.4.5 Caractérisation des purées par rhéométrie couplée à la spectroscopie en moyen infra-rouge

Pour compléter les études rhéologiques et obtenir des informations supplémentaires sur les changements physiques et biochimiques des purées de mangue en lien avec le stade de maturation du fruit, une nouvelle technique innovante, couplant la rhéologie et la spectroscopie moyen infra-rouge, a été utilisée. Grâce à un appareil breveté par Thermofisher Scientific (Rheonaut), l'évaluation simultanée des propriétés rhéologiques et des modifications biochimiques peut être réalisée sur un même échantillon dans les mêmes conditions.

Le Rheonaut HAAKE MARS 60 couplé à un spectromètre Nicolet iS50 FTIR (Thermofisher, Waltham, Massachusetts, USA) (Figure 19), a été utilisé pour la détermination des propriétés viscoélastiques et des changements biochimiques en lien avec les sucres par spectroscopie en moyen infra-rouge des purées de mangue. Le rhéomètre et le spectromètre FTIR étaient tous deux pilotés par les logiciels RheoWin et Omnic (versions 4.82.0002 et 9.9.473). Les données rhéologiques et spectrales ont été enregistrées simultanément toutes les minutes sur une platine ATR (réflexion totale atténuée, *attenuated total reflection*), munie d'un cristal diamant et

positionnée au centre de la plaque fixe du rhéomètre. Toutes les expériences ont été réalisées à $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$.



Figure 19 : Rheonaut HAAKE MARS 60 couplé à un spectromètre Nicolet iS50 FTIR de Thermofisher Scientific.

Caractérisation rhéologique

Les mesures rhéologiques en régime dynamique ont été effectuées en utilisant un module à géométrie plans-parallèles striés (P35/Ti/SE, $\varnothing=35\text{mm}$) avec un entrefer de 2 mm. Un cisaillement de 50 s^{-1} pendant 1 min, suivi d'un temps de repos de 10 min après le dépôt de l'échantillon, ont été imposés avant de réaliser les mesures à une fréquence constante de 1 Hz en faisant varier l'amplitude de déformation de 0,01% à 100%. Pour chaque purée, les évolutions des modules de stockage G' et de perte G'' en fonction de la déformation (%) ont été enregistrées. Les valeurs des modules de stockage G' (Pa) et de perte G'' (Pa) à 1 % de déformation ont été sélectionnées comme indicateurs rhéologiques reflétant le comportement solide et visqueux des purées de mangue, respectivement, dans le domaine viscoélastique linéaire (LVE-R) (domaine dans lequel G' et G'' sont constants).

Caractérisation spectrale en moyen infra-rouge

Les spectres infra-rouges ont été enregistrés en mode ATR dans la région spectrale $4000 - 650\text{ cm}^{-1}$ avec une résolution spectrale de 4 cm^{-1} et un nombre de scans de 8. Les spectres de trois solutions aqueuses de saccharose, de glucose et de fructose (principaux sucres de la mangue) à la concentration de 0,1 g/ml, ont été enregistrés dans les mêmes conditions que celles utilisées pour les purées de mangue.

Pour chaque purée de mangue, 3 spectres ont été enregistrés, prétraités et pris en compte pour les analyses multivariées (ACP). Le prétraitement spectral et les analyses multivariées ont été effectués avec le logiciel Unscrambler (X 10.2, CAMO AS, Oslo, Norvège). Afin, de normaliser les spectres et d'ajuster la ligne de base, le prétraitement SNV (*Standard normal*

variate) qui consiste à centrer l'intégralité du spectre sur sa moyenne et le diviser par son l'écart-type, a été appliqué.

Les analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées sur les données spectrales dans la région 1200 - 960 cm^{-1} relative aux vibrations caractéristiques des sucres (saccharose, glucose et fructose) et permettant ainsi d'éliminer les signaux caractéristiques de l'eau (vibrations d'élongation, ν_{OH} à 3300 cm^{-1} et de déformation δ_{OH} à 1640 cm^{-1}). Chaque nombre d'onde de cette région a été traité comme variable. La représentation graphique des échantillons (*score plot*) est uniquement présentée en fonction des deux premières composantes principales, PC 1 et PC 2, représentant 96 % de la variance totale des données.

2. Deuxième partie : *Les mangues séchées expansées*

2.1. Matière première

Une seule variété de mangue a été choisie pour réaliser les essais de cette deuxième partie :

- (i) Quarante mangues vertes de la variété Kent (*Mangifera indica* L., cv. Kent) provenant du Brésil ont été achetées sur un marché local (Grand Frais, Montpellier, France). Les analyses et traitements ont été effectuées dans les locaux du CIRAD à Montpellier et dans le Centre d'Analyses et de Recherches (CAR) de la Faculté des Sciences de l'Université Saint-Joseph de Beyrouth (FS- USJ).

La mise en place du nouveau procédé de texturation IVDV, permettant de proposer une nouvelle voie de valorisation des mangues sous forme de chips croustillants, a été effectuée sur ce lot de quarante mangues.

Les quarante mangues (*Mangifera indica* L., cv. Kent, Brésil) ont été divisées pour former deux lots de différents stades de maturation. Pour ce faire, une mesure de compression non-destructive, développée dans la première partie de ce travail (cf. 1.2.2 : *Texture non – destructive par compression*, chapitre Matériels et méthodes), a été effectuée sur toutes les mangues, afin d'identifier leur fermeté et par conséquent leurs jours de maturation. Les quarante mangues présentaient, à J_0 (jour de l'achat), une fermeté similaire. En effet, les distances de

compression retenue lors du test de compression (D_{5N}) variaient entre 0,631 et 1.416 mm (cf. Annexe 1, Tableau 1) représentant des jours de maturation compris entre 0 et 10 jours.

Ainsi, vingt mangues ont été sélectionnées, le même jour (J_0), pour former le premier lot (D_{5N} entre 0,654 et 1,416 mm, jour de maturation entre 0 et 10). Les vingt autres mangues ont été stockées pendant environ 10 jours dans une chambre climatique (KBF 720 E2.1, Binder GmbH, Tuttlingen, Allemagne) avec des conditions de température et d'hygrométrie contrôlées (18 °C, 80 % HR) afin d'obtenir le deuxième lot avec des jours de maturation entre 10 et 20 jours. Une mesure de texture a été réalisée après le stockage (J_{10}) pour évaluer la fermeté des mangues et confirmer leurs jours de maturation. Effectivement, les 20 mangues stockées présentaient, des valeurs de D_{5N} entre 1.475 mm et 2.189 mm (cf. Annexe 1) ce qui représentait des jours de maturation entre 10 et 20.

Les mangues des lots 1 et 2 ont été lavées, épluchées et ensuite découpées en tranches de 1 cm d'épaisseur, à l'aide d'une trancheuse à jambon électrique (Trancheuse électrique lame 19 cm – DOMO DP1950S, 100 W, Belgique) généralement utilisée pour la viande transformée. Les tranches de mangues ont été ensuite découpées en cubes de 1 cm³ à l'aide d'un dispositif de découpe à grille (1 x 1 cm²), puis trempées dans l'eau moins de 30 secondes, pour éliminer le sucre dissous en surface.

Les mangues ont été séchées sur deux jours différents, les 20 premières mangues à J_0 et les 20 autres à J_{10} . L'application du procédé de texturation IVDV a été effectuée sur les mangues des deux lots simultanément.

2.2. Le séchage par air-chaud

Le séchage par air-chaud est généralement réalisé avant et après le traitement par IVDV. Le premier séchage ou *pré-séchage* consiste à déshydrater partiellement ou totalement la matière première avant sa texturation. Le deuxième séchage ou *post-séchage* est effectué après la texturation pour ramener la teneur en eau à un niveau permettant une conservation des produits expansés.

Étant donné que les mangues ont été achetées en France et que la durée du transport de la France vers le Liban est susceptible d'engendrer des variations des stades de maturation, le pré-séchage a été réalisé dans les locaux du Cirad à Montpellier et le traitement par IVDV a été effectué dans le centre d'analyses et de recherches au Liban.

Le *pré-séchage* consistait dans cette étude en un séchage partiel. Les cubes de mangues de 1 cm³ ont été disposés en une seule couche et séchés dans un séchoir à air chaud (UTA, Cirad) à 60°C pendant 24h, à une vitesse d'air de 2,8 m/s et une humidité relative de 14 %. Les cubes de mangue ont été séchés jusqu'à atteindre les teneurs en eau appropriées et souhaitées selon le plan d'expérience utilisé pour cette étude (cf. section 2.5.1 description du plan expérience) soit (9,9 ; 15 ; 22,5 ; 30 et 35,1 %). Suite à cette étape de *pré-séchage*, les cubes de mangues ont été stockés pendant trois jours à 4°C, afin d'assurer une meilleure homogénéisation et une distribution uniforme de l'eau résiduelle.

L'étape de *post- séchage*, réalisée après texturation sur les cubes de mangues expansés, a été effectuée dans une étuve munie de ventilateurs dans le centre d'analyses et de recherches (FS, USJ), pendant 24h à 60 °C afin d'atteindre une teneur en eau de 8%.

2.3. L'équipement IVDV et le processus d'expansion

Les cubes de mangues ont subi une expansion dans le réacteur IVDV. Ce réacteur et les processus d'expansion ont été détaillés dans les sections 3.3.1 et 3.3.2, de l'état de l'art, respectivement.

2.4. Caractérisation physico-chimique des cubes de mangues séchés et expansés

2.4.1 Le taux d'expansion

Le taux d'expansion (ER) des cubes de mangues a été mesuré afin d'évaluer l'augmentation du volume des cubes de mangues après traitement par IVDV. Les mesures ont été effectuées selon la méthode décrite par Louka et al., 2004 qui consiste à mesurer la masse volumique des cubes de mangues séchés, considérés comme témoins (ρ_s ; séchage par air chaud), et des cubes expansés (ρ_e ; combinaison séchage à air chaud et traitement par IVDV). Le taux d'expansion (ER) a été obtenu selon l'équation 11 :

$$ER = \frac{\rho_s}{\rho_e} \quad \text{Eq. 11}$$

Avec ρ_s , la masse volumique des cubes de mangues séchés uniquement par air chaud et ρ_e , la masse volumique des cubes de mangues traités par IVDV.

2.4.2 La texture

Les mesures de texture ont été effectuées sur les cubes de mangues traités par IVDV et sur ceux séchés à l'air chaud, afin de comparer la dureté des deux produits.

Le choix de la sonde utilisée pour les mesures de texture a fait objet d'une étude exploratoire afin de trouver la sonde la plus reproductible pour discriminer les échantillons. Deux sondes ont été testées : une lame de couteau artisanal (Stable micro Systems - Craft Knife (A/CKB), 6 cm de largeur et 0,6 mm d'épaisseur) et une sonde sphérique (Stable micro Systems - Spherical probe (P/1S • • • • P/MT), 2 cm de diamètre), sur différents échantillons de différents points du plan d'expérience. Des analyses de variance (ANOVA) ont été appliquées et les résultats ont montré que la lame de couteau était la plus discriminante et la plus répétable (cf. Annexe 2).

Ainsi, à l'aide d'un analyseur de texture (TA-XT2, Stable micro Systems, Londres, UK) équipé d'une cellule de charge de 5 kg, des mesures de compression ont été effectuées sur les cubes de mangues séchés et expansés à l'aide d'une lame de couteau artisanal (6 cm de largeur et 0,6 mm d'épaisseur) à une vitesse de coupe de 0,5 mm/s. Les mesures de texture ont été effectuées pour atteindre une force de compression maximale nécessaire pour couper l'échantillon. La variation de la force en fonction de la distance parcourue par la sonde a été enregistrée à l'aide du logiciel Exponent (version 5.1.1.0).

Les profils de texture obtenus ont permis de calculer trois paramètres : la dureté (HARD, en N), définie comme la force maximale nécessaire pour casser l'échantillon (Meng et al., 2010), le nombre de fractures (QF), identifié par le nombre de pics, désigne la croustillance de l'échantillon (Lazou and Krokida, 2010) et le WD (en mJ) représentant l'énergie nécessaire pour surmonter les liaisons structurelles internes au sein des cubes de mangue (Nader et al., 2016a). Les mesures de texture ont été effectuées sur 10 cubes de chaque point du plan d'expérience et les résultats ont été moyennés.

2.4.3 Couleur

La couleur des cubes de mangues séchés et expansés a été mesurée à l'aide d'un colorimètre Minolta CR-300 (Konica Minolta Sensing, Inc, Ramsey, New Jersey, USA) selon le système de couleur CIELAB (L^* , a^* , b^*) avec L^* représentant la luminosité variant de 0 à 100, (0 représentant le noir et 100 le blanc), a^* représentant la variation du vert (-) au rouge (+) et le b^* reflétant la variation du bleu (-) au jaune (+). Six répétitions ont été effectuées sur 8 cubes de

mangues broyées de chaque point du plan d'expérience et l'écart de couleur (ΔE) a été calculé selon l'équation 12 : (Gowen et al., 2006; Kaur et al., 2005; Mrad et al., 2015).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{Eq. 12}$$

2.5. Optimisation par la méthodologie de surface de réponse

Les plans d'expériences, développés dans les années 30 par Sir Ronald Fischer, consistent à concevoir un plan avec le minimum d'essais possibles en se basant sur la statistique. La méthodologie de surface de réponse (MSR) permet d'augmenter le nombre de facteurs à étudier, de modéliser les réponses et de quantifier les interactions qui ont lieu entre les paramètres opératoires en assurant une prédiction et une optimisation des réponses.

2.5.1 Le plan d'expérience

La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été adoptée dans ce travail pour étudier l'effet de différents paramètres opérationnels lors du traitement des cubes de mangues par IVDV.

Les trois paramètres opérationnels les plus influents, étaient la pression de vapeur saturante (P), la teneur en eau initiale (W) et le temps de traitement (t). La pression était comprise entre 0,2 et 0,7 MPa, tandis que la teneur en eau variait entre 9,9 et 35,1 % (bs) et le temps de traitement entre 9,9 et 35,1 s.

La gamme de variation ainsi que les points centraux des paramètres opérationnels, ont été choisis sur la base d'essais préliminaires. Les cinq niveaux de chaque paramètre ont été présentés avec leurs réels correspondants et codés ($-\alpha$, -1, 0, +1, $+\alpha$) comme présentés dans le tableau 6. Le tableau 7, présente le plan composite centré établi, composé d'un plan factoriel à 2^3 points avec 6 points centraux pour les répétitions et 6 points axiaux (étoiles). Afin d'identifier leurs niveaux optimaux, les paramètres opérationnels ont été testés sur 20 points pour évaluer leurs effets sur le taux d'expansion (ER), la dureté du cube (HARD), le nombre de fracture (QF), l'énergie (WD), ainsi que sur les paramètres colorimétriques (L^* , a^* et b^*) et l'écart de couleur (ΔE). Les expériences ont été menées de manière aléatoire afin de minimiser les effets de la variabilité inattendue des réponses observées. Le traitement par IVDV a été réalisé sur trois répétitions et les valeurs des réponses ont été moyennées. Le plan d'expérience et le traitement

des données des résultats obtenus ont été réalisés à l'aide du logiciel Statgraphics Plus (version 19.2.01, Windows).

Tableau 6 : Les paramètres de traitement et les plages de variation de pression de vapeur saturante (P), la teneur en eau initiale (W) et le temps de traitement (t).

Variables	Niveaux des Variables				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Pression : P (MPa)	0,2	0,3	0,45	0,6	0,7
Teneur en eau : W (%)	9,9	15	22,5	30	35,1
Temps : t (s)	9,9	15	22,5	30	35,1

Tableau 7 : Le plan composite centré avec les combinaisons de variables indépendantes : la vapeur saturante (P), la teneur en eau initiale (W) et le temps de traitement (t).

Essai		Niveaux des variables non codés		
		Pression P (MPa)	Teneur en eau W (%)	Temps de traitement t (s)
1		0.3	15	15
2		0.6	15	15
3		0.3	30	15
4	Points	0.6	30	15
5	Factoriels	0.3	15	30
6		0.6	15	30
7		0.3	30	30
8		0.6	30	30
9		0.2	22.5	22.5
10		0.7	22.5	22.5
11		0.45	9.9	22.5
12	Points axiaux	0.45	35.1	22.5
13		0.45	22.5	9.9
14		0.45	22.5	35.1
15		0.45	22.5	22.5
16		0.45	22.5	22.5
17	Points	0.45	22.5	22.5
18	Centraux	0.45	22.5	22.5
19		0.45	22.5	22.5
20		0.45	22.5	22.5

2.5.2 Modélisation mathématique

Une fonction mathématique est choisie pour relier les réponses aux variables. Dans le cas de trois paramètres expérimentaux (X_1 , X_2 et X_3), l'équation polynomiale de régression de second degré est ajustée à chaque réponse pour décrire de manière empirique le processus. L'équation polynomiale du second degré est de la forme suivante (Eq. 13) :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j>i}^3 a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 \quad \text{Avec } j > i \quad \text{Eq. 13}$$

où Y est la réponse prédite ; X_i , X_j sont les niveaux codés des variables indépendantes ; a_0 est la valeur moyenne de la réponse aux points centraux de l'expérience (0, 0, 0), a_i , a_{ii} et a_{ij} sont les coefficients des paramètres des modèles linéaire, quadratique et d'interaction, respectivement.

2.5.3 Les analyses statistiques

Toutes les mesures ont été effectuées en trois exemplaires afin de garantir la répétabilité des résultats. La reproductibilité a été couverte par les six répétitions au niveau central, comme le suggère le plan d'expérience. Les données rapportées sont présentées sous forme de moyenne $\pm$ l'écart-type. Toutes les données ont été traitées par des analyses de la variance (ANOVA) et des tests de moindre différence significative (LSD), à l'aide du logiciel STATGRAPHICS® Centurion XV (Statgraphics 19, The Plains, Virginia).

Chapitre 3. Résultats et discussion

CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. **Caractérisation des mangues fraîches et des purées de mangues au cours de la maturation : outils de prédiction des propriétés des purées**

1.1. **Préambule**

L'optimisation des propriétés physiques et biochimiques des purées à base de fruits constitue une étape importante assurant l'obtention de produits dotés de propriétés organoleptiques attirantes. Cette optimisation nécessite une compréhension préalable des différents facteurs agissant sur les propriétés des suspensions de fruits. Des facteurs intrinsèques liés à la variété, la maturité du fruit, ainsi que des facteurs extrinsèques en lien avec la transformation (broyage, traitements thermiques), le stockage, etc., semblent jouer un rôle majeur dans le développement des propriétés physiques et biochimiques des purées de fruits.

Étant donné que la mangue est considérée comme un fruit climactérique, la transformation des mangues en purée nécessite une compréhension de l'effet de la maturation sur les propriétés de ces dernières. De plus, le développement de méthodes fiables pour un contrôle des propriétés physiques et biochimiques des purées au cours de la maturation permettra de mieux contrôler *l'hétérogénéité des fruits en lien avec leur stade de maturation avant leur transformation en purée*.

Même si les effets des réactions biochimiques, qui ont lieu au cours de la maturation des mangues, sur les propriétés physiques, physico-chimiques et biochimiques des fruits ont été mis en évidence par différents travaux, très peu d'études se sont intéressées à l'évaluation de l'effet de la maturation des mangues sur les propriétés physiques et physico-chimiques des purées de mangues. De plus, aucun outil n'a été proposé à ce jour pour contrôler rapidement le stade de maturation des mangues dans une optique d'anticiper les propriétés des purées qui en découlent. Dans ce travail, une stratégie expérimentale innovante, basée non seulement sur des mesures physiques conventionnelles mais aussi sur une nouvelle technique couplant la rhéologie à des mesures spectrales, a été mise en place dans un premier temps pour identifier les changements

physiques et biochimiques majeurs des purées en lien avec le stade de maturation des mangues. La caractérisation des purées de mangues a ainsi porté sur la distribution granulométrique et le comportement rhéologique en petites déformations, accompagnés de mesures simultanées des propriétés viscoélastiques et des changements biochimiques en lien avec les sucres par spectroscopie en moyen infra-rouge.

Dans un second temps, un outil de mesure non-destructif a été développé pour pouvoir remonter aux propriétés physiques des purées suite à une simple mesure de la fermeté de la mangue.

L'intérêt de ce premier travail est d'apporter de nouvelles connaissances sur les caractérisations potentiellement utiles à une meilleure perception de l'étape de maturation des mangues avant leur transformation en purée et espérer ainsi une meilleure optimisation et maîtrise des propriétés organoleptiques des purées produites.

1.2. Évaluation des changements physiques et biochimiques des purées au cours de la maturation des mangues et mise en place d'un outil rapide pour la prédiction de ces changements

Les résultats obtenus sont présentés ci-après sous la forme d'un article, intitulé *Impact of ripening on the physical properties of mango purees and application of simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy for rapid identification of biochemical and rheological changes*, publié dans Journal of Food Engineering (Labaky et al., 2021). Une conclusion succincte succède à cet article.

1.2.1 Impact of ripening on the physical properties of mango purees and application of simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy for rapid identification of biochemical and rheological changes.

(Labaky, P. et al., Journal of Food Engineering Volume 300, July 2021, 110507)
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110507>

Abstract

This study proposed to investigate the impact of ripening on the physical properties of mango purees. An extensive study of the particle size and rheological properties of mango purees and their dispersed phase was performed using particle size measurements, small deformation rheology, and an innovative technology combining simultaneous rheometry and *in situ* FTIR spectroscopy. The results revealed a sharp decrease in the solid-like behavior of mango purees, as well as in the energy of cohesion of their dispersed phase during the first 10 days of ripening, leading to a weakening of their gel-structure. The size of suspended insoluble solids in the purees continued to decrease until 15 days of ripening. According to the spectral fingerprints, it was possible to identify some changes in the purees' sugar content occurring upon the physical changes during ripening. The highest sucrose and lowest fructose contents were observed in purees obtained during the first 10 days of ripening, in comparison with the following days. Based on the twin physical and spectral fingerprints, purees obtained from the early days of ripening (< 10 days) could be distinguished from other purees.

Keywords

Fruit ripening, mango fruit puree, rheology, FTIR spectroscopy, particle size

Highlights

- The cohesion energy and size of puree particles decreased during ripening
- The gel structure and network strength of puree weakened during ripening
- High sucrose and low fructose contents characterized purees < 10 days of ripening
- Purees obtained before day 10 of ripening could be distinguished from other purees

Introduction

Fruit purees are highly prized fruit-based products due to their pleasant organoleptic properties and to their nutritional composition characterized by biologically active components, such as antioxidants, like phenolic compounds and many vitamins (Ma et al., 2011; Wen and Wrolstad, 2002). Fruit purees are also used as a natural food ingredient to enhance the flavor and the texture of many beverages and pastry products (Fügel et al., 2005). Nowadays, consumers are increasingly demanding and seeking out “fresh-like” and attractive products with pleasant organoleptic properties in terms of texture and taste. Optimizing fruit puree texture is a key step to achieving attractive organoleptic properties (Suntudprom et al., 2011) but requires, first of all, a good knowledge of the fruit purees' properties.

From a physico-chemical perspective, fruit purees are considered complex and heterogeneous suspensions due to the presence of compounds with different physical and biochemical properties. They are composed of insoluble particles (mainly of cell wall component) dispersed in a aqueous serum rich in various solutes (sugars, organic acids, phenolic compounds, pectins and salts) (Leverrier, 2016). The overall texture of fruit purees is closely linked to the physical (particles size, rheological behavior) and biochemical properties of the dispersed and the aqueous phases. Many authors have revealed the important role of the dispersed matter (particles size, shape and interactions) in the overall rheological properties of some fruit purees (apple, peach, tomato etc.) (Alvarez et al., 2004; Espinosa et al., 2011; Leverrier et al., 2016; Lopez-Sanchez et al., 2012; Massa et al., 2010). Moreover, these rheological properties seem to depend on intrinsic factors related to the fruit variety, as well as on extrinsic factors due to the fruit processing (e.g. conditions of operations units such as grinding and thermal

stabilization) (Brisset, 2009; Huang et al., 2018; Kumar et al., 2015; Makroo et al., 2019; Massa et al., 2010).

Besides, the impact of fruit variety, ripeness stage and storage conditions on apple puree texture was recently highlighted (Lan et al., 2020). Moreover, Leverrier et al., 2016, also reported changes in the physical properties of apple puree particles in relation to different grinding conditions. As for mango purees, even if many studies have shown that the rheological properties of mango purees are affected by several factors, few studies have evaluated the effect of mango ripening on the overall physical properties of mango purees (Labaky et al., 2020). However, it is well known that the biochemical reactions (cell wall degradation, changes in organic acids and sugar concentrations, etc.), occurring during ripening, lead to important variations of the fruit texture (Jarimopas & Kitthawee, 2007; Palafox-Carlos et al., 2012; Prasanna et al., 2003).

In light of this, the main objective of this work was to investigate the impact of mango ripening on the physical properties of mango purees. An extensive study was proposed to determine the particle size and the rheological properties of mango purees in relation to ripening duration. Conventional small deformation rheological measurements provided information concerning the viscoelastic behavior, the cohesion energy and the gel properties of mango purees. To supplement these rheological data and to provide complementary information concerning the sugar changes that might occur during ripening, simultaneous rheometry coupled with *in situ* FTIR spectroscopy was also used. Simultaneous rheometry and *in situ* FTIR spectroscopy is an innovative technique used in the pharmaceutical and polymers fields to measure simultaneously rheological properties and structural changes on the molecular level on a sample under exactly the same conditions (Darsy et al., 2015; Monteyne et al., 2016). This coupled technique was used in this present work in order to obtain fast and simultaneous rheological and spectral information about mango puree properties, while reducing the impact of sample heterogeneity on either measurement.

Materials and methods

Raw materials

Green mangos (*Mangifera indica* L., cv. *Kent*, Peru), previously stored at 10 °C for 10 days (to slow down maturation), were purchased from a local warehouse (Georges Helfer SA, Plan d'Orgon, France). All mangos were stored in controlled conditions (18 °C, 80 % RH) for between one and twenty-five days. Analyses were carried out at 20 different points during

ripening on one or two mangos (duplicates for 7 different sampling points). Mangos were soaked in chlorinated water for 5 mins at room temperature (200 ppm sodium hypochlorite, Chem-Lab, Zedelgem, Belgium) and wiped with 70 % ethanol (Honeywell, Riedel-de Haën, absolute, ≥ 99.9 , Charlotte, North Carolina, USA).

Sample preparation

Mango Purees

Each mango was manually peeled and the flesh was cut into small cubes (around 1 cm³) and ground at 25°C with a Thermomix (Vorwerk, Typ 31-1, Wuppertal, Germany) under standardized grinding conditions (1,000 rpm for 1 min, 7,000 rpm for 1 min and 10,000 rpm for 2 mins). The puree was stored at 4°C before the analyses.

Suspended insoluble solids (SIS)

Suspended insoluble solids (SIS, g/100g) were obtained by centrifuging 10 g of each puree at 18,000 g at 25°C for 30 mins (Eppendorf Model 5810 R centrifuge, Hamburg, Germany), and removing the supernatant containing the serum phase rich in colloids and soluble compounds. These centrifuging conditions (acceleration and centrifuging time) were chosen to isolate particles larger than 1 µm, representing the dispersed phase as described by Dahdouh et al., 2016.

Mango puree characterization

Size of suspended insoluble solids

Particle size distribution was determined by LASER diffraction using a Malvern Mastersizer (Mastersizer 3000, Malvern Instruments Limited, Worcestershire, UK). Measurements were carried out in triplicate on suspended insoluble solids (SIS) of each puree in wet mode (obscuration 20% and stirring of 1,500 rpm) according to Dahdouh et al., 2016. The surface area average diameter D [3;2] (Sauter mean diameter) was selected as a size indicator for puree SIS. The D [3;2] indicates the diameter of a sphere that has the same volume/surface ratio as the set of particles (Eq.1):

$$D [3;2] = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2} \quad \text{Eq.1}$$

Where n_i is the number of particles of diameter d_i .

Conventional small deformation rheological measurements

Specific cohesion energy of suspended insoluble solids

Oscillatory measurements were conducted on the suspended insoluble solids (SIS) of each mango puree using the Haake Mars 60 rheometer in conjunction with RheoWin software. Strain sweep tests including a 5-min resting time after loading the sample followed by a strain variation from 0.01 to 100 % at a constant frequency of 1 Hz were performed at $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ using serrated parallel plates (P35/Ti/SE, $\varnothing=35\text{mm}$) with a 2 mm gap. The evolution of storage G' (Pa) and loss G'' (Pa) moduli as function of strain (%) was recorded. In order to quantify the strength of interaction between suspended insoluble solids in the mango purees, the specific cohesion energy (E_c , Pa or $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$) of their 3D network was quantified. E_c was calculated based on the storage modulus G' in the viscoelastic linear region (LVE-R) in which G' remains constant, according to Eq. 2 (Bossard et al., 2007; Hammas et al., 2019; Megías-Alguacil, 2004).

$$E_c = \frac{1}{2} G'_{\text{LVE-R}} \cdot \gamma_c^2 \quad \text{Eq.2}$$

Where $G'_{\text{LVE-R}}$ (Pa) is the storage modulus determined in the linear viscoelastic domain, and γ_c (%) its corresponding critical shear strain.

Viscoelastic behavior and gel properties of mango purees

The gel properties of the mango purees were studied through oscillatory frequency sweep measurements conducted at $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ using a Physica MCR301 rheometer (Anton Paar GmbH, Graz, Austria) equipped with a Peltier system and connected to “Start Rheoplus” software (version RHEOPLUS/32 V3.40). A six-blade vane geometry (ST22- 6V- 16, $\varnothing= 22$ mm) was used with a stationary cup, with a diameter of 28.7 mm. Measurements were performed in the linear viscoelastic region (determined through a strain sweep test at a constant frequency of 1 Hz) to investigate the dependency of the viscoelastic behavior of the mango purees on the frequency. A pre-shearing of 50 s^{-1} for 1 min followed by a 10-min resting time after loading the sample were imposed before varying the frequency (f) from 0.1 to 10 rad/s while the strain (γ) was kept constant at 0.1%. The evolution of the storage G' (Pa) and loss G'' (Pa) moduli as function of frequency (f , rad/s) was recorded. The frequency dependency of both storage G' and loss G'' moduli was assessed through a power Law (Eq. 3 and 4) as described by Xu et al., 2017, and Albano et al., 2014, :

$$G' = A' \cdot f^{n'} \quad \text{Eq.3}$$

$$G'' = A'' \cdot f^{n''} \quad \text{Eq.4}$$

where A' and A'' ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$), the constants related to gel strength, reflect respectively the elastic and the viscous properties of the puree, n' and n'' , the relaxation exponents, provide information concerning the frequency dependency of the storage and loss moduli, and f is the frequency (rad/s).

All conventional small deformation rheological measurements were performed at least in triplicate to ensure the consistency of the results.

Simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy

The rheological and spectral measurements of mango purees were carried out simultaneously using a Haake Mars 60 rheometer equipped with a Rheonaut module coupled to a Nicolet iS50 FTIR spectrometer (ThermoFisher, Waltham, Massachusetts, USA). The rheometer and the FTIR spectrometer were both controlled by the RheoWin and Omnic software (version 4.82.0002, 9.9.473), respectively. Rheological and spectral data were simultaneously recorded (every minute) thanks to the attenuated total reflectance diamond (ATR) implemented on the center of the stationary plate (Peltier system with ATR). All experiments were performed at $25^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$.

Amplitude sweep tests were carried out in triplicate using serrated parallel plates geometry (P35/Ti/SE, $\varnothing=35\text{mm}$) with a gap of 2 mm. A pre-shearing of 50 s^{-1} for 1 min followed by a 10-min resting time after loading the sample, were imposed before varying the strain from 0.01% to 100% at a constant frequency of 1 Hz. Values of the storage G' and loss G'' moduli (Pa) at 1% strain were selected as rheological indicators reflecting the solid-like behavior and the viscous-like behavior within the linear viscoelastic region, respectively.

The IR spectra were recorded in the $4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$ range with 8 scans at 4 wavenumber resolution. For each mango puree sample, 3 spectra were recorded and considered for the multivariate analyses (PCA). In order to analyze the mango puree spectra in relation to major mango sugars (i.e. sucrose, glucose and fructose), three aqueous solutions of sucrose, glucose and fructose were prepared at 0.1 g/mL , and analyzed through IR measurements under the same conditions used for the mango purees.

Spectral pre-processing and multivariate analyses were performed with the Unscrambler software (X 10.2, CAMO AS, Oslo, Norway). All the FTIR data were pre-processed with standard normal variate (SNV) to remove multiplicative interferences and variations in baseline

shifts. Principal component analyses (PCA) were applied to the spectra in the 1200 - 960 cm^{-1} region, corresponding to the sugars (sucrose, glucose and fructose), within each wavenumber were treated as variables. The two absorption bands observed around 3300 cm^{-1} and 1640 cm^{-1} were not considered, as they correspond to the OH stretching and bending vibration of water, respectively. The score plot was extracted only from the first two principal components, PC 1 and PC 2, as they explained 96 % of the data variance.

Results and discussion

Mango puree characterization

The physical properties of fruit purees depend on the suspended insoluble solids (e.g. size, particles interactions) and the serum properties, on the variety and the ripening of fruits as well as on the processing conditions (e.g. grinding) (Espinosa et al., 2011). In this study, the same variety of mango (*Mangifera indica* L., cv. *Kent*) was used, as well as standardized grinding conditions, to focus only on the impact of ripening on the physical properties of the purees. Particle size measurements and small deformation rheology (strain and frequency sweep tests) were used to evaluate the impact of ripening on (i) the size and the specific cohesion energy of suspended insoluble solids and on (ii) the viscoelastic behavior and the gel properties of the mango purees.

Size of suspended insoluble solids

The purees SIS size distribution is typical of polydisperse suspensions with a monomodal size distribution as reported in the literature for many fruit suspensions, such as apple purees and fruit juices (Fig.1) (Dahdouh et al., 2016; Leverrier et al., 2016). It can be noted that a high volume density of particles around 1,000 μm characterized the SIS of purees obtained in the early stage of ripening (e.g. day 2). The volume density of these large particles decreased considerably as the stage of ripening increased (e.g. day 14), to disappear in the late stage of ripening (e.g. day 25) where the highest volume density of particles was around 200 μm . Moreover, $D[3;2]$, a relevant indicator of puree SIS size, decreased significantly upon reaching 15 days of ripening and then stabilized afterwards. The sharpest decrease was noticed during the 10 first days of ripening.

Since all the mangos were ground under the same standardized conditions, it is possible to highlight that purees from the early days of ripening (< 10 days) were characterized by significantly larger SIS size, probably due to their higher resistance to grinding. The changes

occurring in mango fruits after 15 days of ripening seemed to have little impact on the particles' resistance to grinding and subsequently on the particle size distribution of the mango purees. These observations are in accordance with a recent study that showed that mango puree SIS size decreases significantly during the first 10 days of ripening (in similar conditions of ripening: 18°C, 80% RH), due to the loss of the firmness and the solid-like behavior of mango flesh (Labaky et al., 2020). The authors attributed these textural changes to well-known biochemical modifications occurring during mango ripening and mostly the hydrolysis of specific compounds such as starch, pectins and cell walls due to the activity of a complex multi-enzyme process (Cárdenas-Pérez et al., 2018; Venkatesan and Tamilmani, 2013).

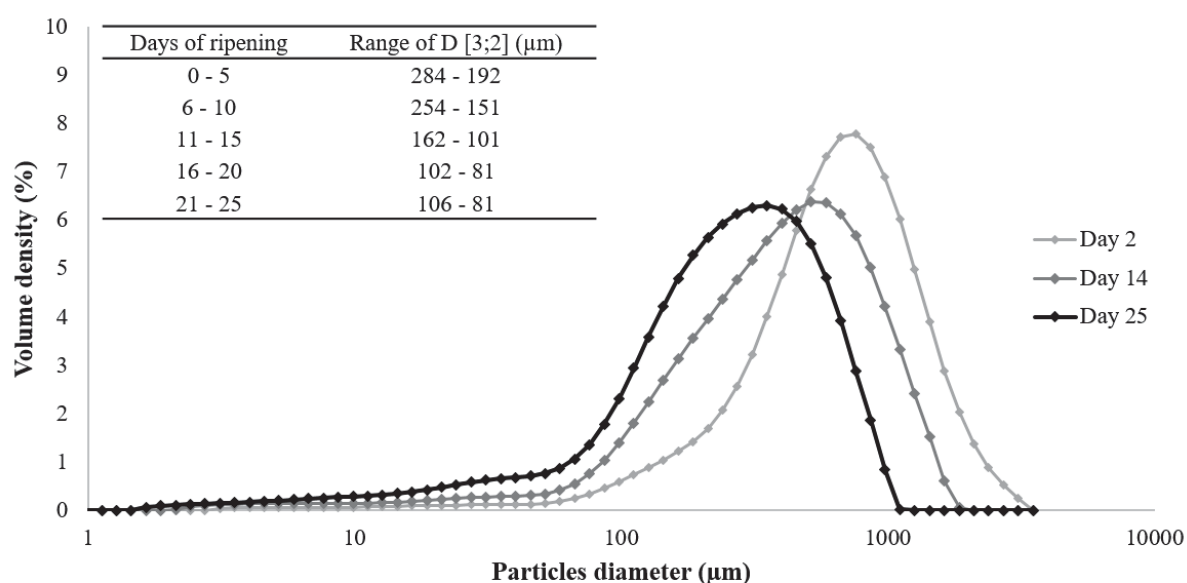


Fig. 1. Particle size distribution of three mango purees at different days of ripening (day 2, 14 and 25) and the range of the Sauter mean diameter D [3;2] (μm) for different ripening stages. All the given values are the average of three trials and all standard deviation values are less than 5% of the average value.

Specific energy of cohesion of suspended insoluble solids

For all purees SIS, rheological parameters revealed a predominance of a solid-like behavior ($G' > G''$) in the linear viscoelastic region (LVE-R, steady storage G' and loss G'' moduli for strain $< 1\%$) (data not shown). Although all the purees' SIS showed a similar viscoelastic behavior at different ripening stages, Fig. 2 highlights an overall decrease in the specific cohesion energy (E_c) of the SIS network as ripening progressed. Indeed, the SIS cohesion energy decreased sharply from 6.7 to 1.3 kPa before 10 days of ripening, before entering an almost steady state (1.7 to 0.7 kPa). According to these observations, the changes occurring in mango fruits mainly

during the 10 first days of ripening, seem to favor not only a reduction in the SIS size, but also, in their interactions and the strength of their 3D network.

Many studies have shown that an increase of the cohesion energy of a suspension reveals a tighter network of particles due to higher particle-particle interactions (Alazzawi et al., 2020; Lafforgue et al., 2018). For different types of suspensions, these variations of cohesion energy can be related to many factors, such as the charge on the particle surface (Megías-Alguacil, 2004), the particle size and the particle concentration (Alazzawi et al., 2020). The important role of interactions between suspended insoluble solids (SIS) in the rheological behavior and the structure stability of fruit-based suspensions has been reported in the literature (Dahdouh et al., 2016; Leverrier et al., 2016). Furthermore, for fruit-based suspensions, Dahdouh et al., 2015, 2016, reported a decrease in the cohesion energy (particle - particle interactions) of fruit juice SIS when their size and their concentration decreased. In the case of mango puree, the decrease in interactions between SIS could be explained by their size reduction highlighted previously, as well as by several physico-chemical changes occurring during ripening such as the particle charges, the organic acids (mostly malic and citric acids) concentrations, the sugars contents (mainly sucrose, glucose and fructose) and the pH, etc. (Gawkowska et al., 2018; Labaky et al., 2020; Megías-Alguacil, 2004; Ueda et al., 2001). Contrariwise, after 10 days of ripening, the biochemical and physico-chemical changes had little impact on the structure and the interactions of the SIS network.

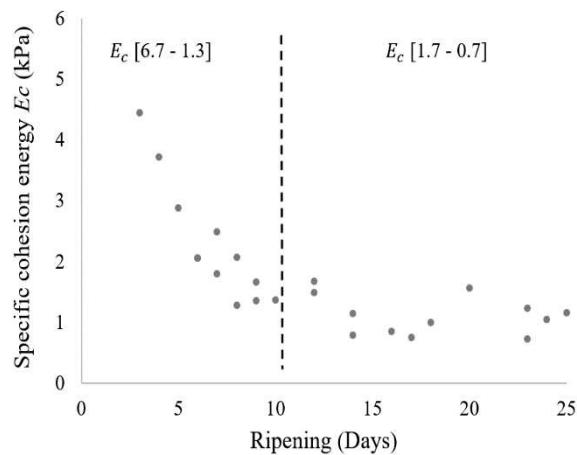


Fig. 2. Specific cohesion energy E_c (kPa) of puree SIS as a function of ripening (days).

Viscoelastic behaviour and gel properties of mango purees

The storage and the loss moduli increased slightly with increasing frequency, indicating that the viscoelastic properties of mango purees for all days of ripening are frequency dependent

(Fig. 3). The storage modulus G' of purees was higher than the loss modulus G'' by less than a decade over the whole frequency range with no observed crossover (where G'' exceed G'). Moreover, for all purees, the ratio G''/G' (named Loss factor or Damping factor, $\tan \delta$) at 1 rad/s frequency presented values below 1 (between 0.189 and 0.257), showing that mango purees behave like weak gels with a structured network of particles and a predominant solid-like behavior (Mousavi et al., 2020). These results are in accordance with the literature, as many authors have reported similar viscoelastic properties for other fruit and vegetable suspensions (Ahmed and Ramaswamy, 2006; Day et al., 2010; Leverrier et al., 2016).

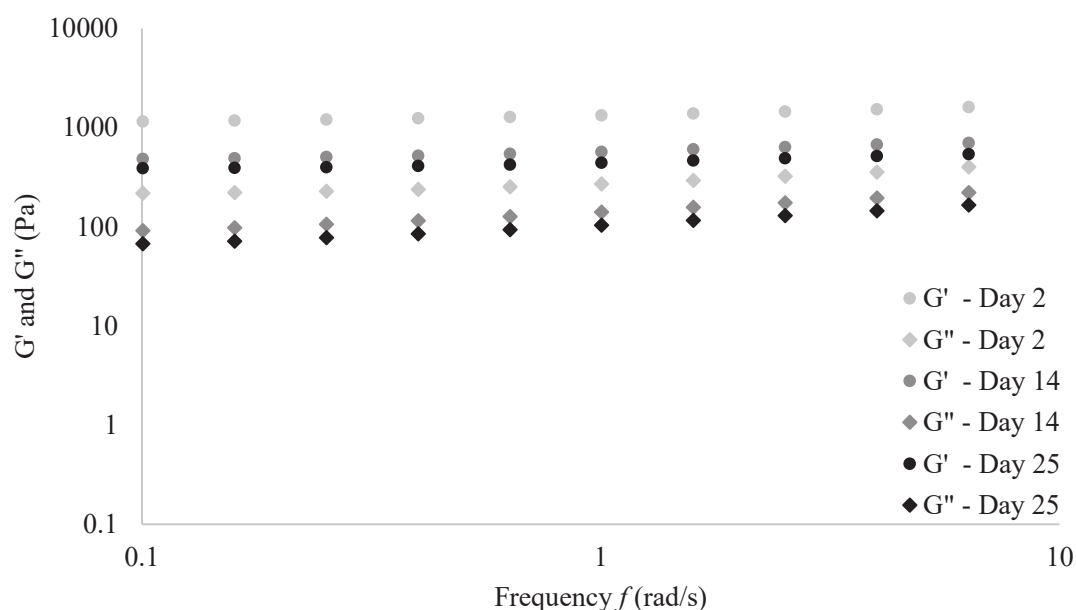


Fig. 3. Storage modulus G' and loss modulus G'' (Pa) of three mango purees at different days of ripening (day 2, 14 and 25) as a function of the frequency f (rad/s).

For all the mango purees, the frequency dependency of both storage G' and loss G'' moduli was assessed through a power Law equation with a determination coefficient (R^2) above 0.9 for all the samples. As described by Xu et al., 2017, A' and A'' (Pa.s^n) reflect respectively the solid and the viscous properties of the puree, n' and n'' provide information concerning the frequency dependency of the storage and loss moduli (Fig 4). The A' values decreased significantly during the first 10 days of ripening before reaching steady values, whereas only a very slight decrease of A'' was observed during the 5 first days of ripening. These results show that during the early ripening stage (< 10 days) the solid-like behavior of mango puree, unlike the viscous-like behavior, decreased significantly. This trend is in line with the evolution of the cohesion energy and the SIS size before 10 days of ripening. In this early ripening stage, the high interactions between large SIS could explain the higher solid-like behavior and the strength of the puree network. The higher values of n' and n'' obtained for ripening stages beyond 10 days also

revealed a higher frequency dependency of the storage and loss moduli (G' and G'') for these mango purees, confirming their weak gel behavior (n values close to 0 reveal slight frequency dependency of the viscoelastic moduli, which is typical of elastic gels behavior). Moreover, n'' increased slightly during the 10 first days of ripening before remaining steady, indicating a weaker gel-structure of the purees and a reduction in their network after these 10 first days (Chaux-Gutiérrez et al., 2019; Mousavi et al., 2020).

The changes in the purees' gel-structure occurring during the early stage of ripening could be related to the enzymatic reactions occurring in cell walls, leading to major structural modifications of the polysaccharides, mainly protopectins (Maldonado-Celis et al., 2019). Indeed, during ripening, protopectins are hydrolyzed into soluble pectins and their structure is drastically modified due to complex multi-enzyme processes (polygalacturonase (PG) and pectinmethylesterase (PME)), leading to fruit softening and texture loss (Cárdenas-Pérez et al., 2018; Gawkowska et al., 2018; Hultin & Levine, 1965; Iagher et al., 2002; Yashoda et al., 2007). Moreover, the rheological properties and the gelling mechanism of hydrolyzed pectins depend on their intrinsic properties (galacturonic acid content, molecular weight, degree of methylation, distribution of methoxyl groups etc.), as well as on extrinsic biochemical factors (pH, total acidity, ionic strength, sugar concentrations, etc.) (Gawkowska et al., 2018; Maldonado-Celis et al., 2019; Megías-Alguacil, 2004). These complex biochemical changes in relation to pectins could explain the weaker gel-structure of the purees after 10 days of ripening, and their lower network strength.

To sum up, according to the oscillatory frequency sweep tests, mango purees from early ripening stages (< 10 days) could be characterized by their specific gel-structure with higher solid-like behavior and network strength (higher A' values (1206 - 436 Pa.sⁿ) and lower n'' values (0.16 - 0.22). Contrariwise, purees from more ripened fruits had lower A' values (600 - 366 Pa.sⁿ) and slightly higher n'' (0.19 - 0.24). These results emphasized the important impact of biochemical changes occurring during the first 10 days of mango ripening on the specific rheological properties of purees.

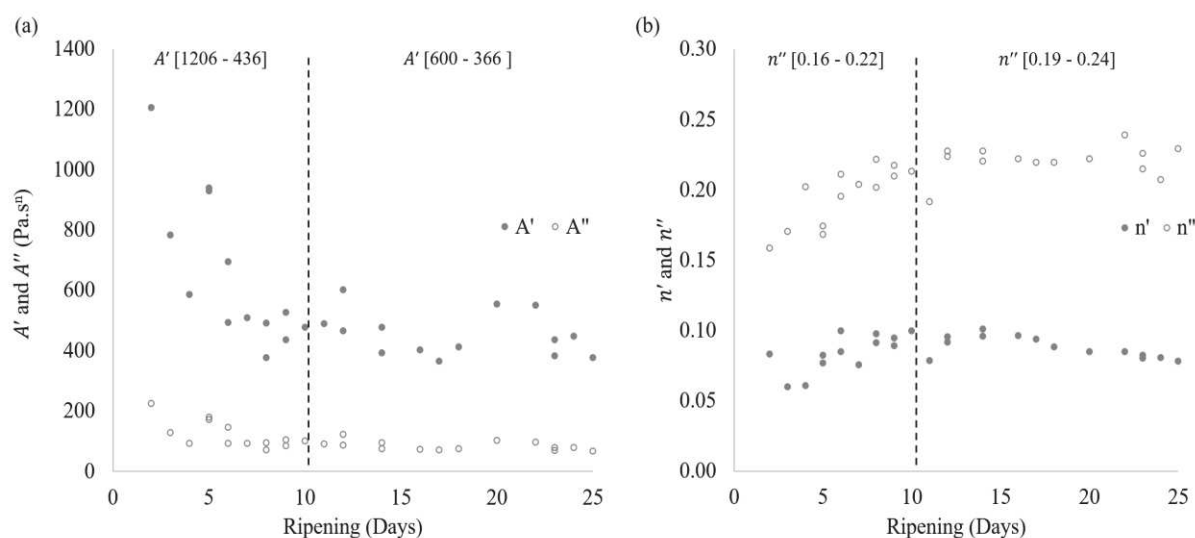


Fig. 4. (a) A' and A'' in Pa.s^n the constants related to gel strength and (b) n' and n'' the relaxation exponents, obtained from the power law (Eq.3 and 4), as a function of ripening (days).

Simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy

The previous extensive study based on particle size measurements and small deformation rheology were able to highlight an important impact of ripening on the physical properties of mango purees (SIS size and cohesion, as well as their viscoelastic behavior and gel properties), mostly during the first 10 days of ripening. Many studies have reported changes in sucrose, glucose and fructose (obtained from polysaccharide hydrolysis, mainly starch degradation) during fruit ripening (Castrillo et al., 1992; Medlicott & Thompson, 1985; Ueda et al., 2001). Furthermore, many works have shown the usefulness of using Fourier transform mid-infrared spectroscopy for sugars and organic acids analyses in many fruit based-foods and beverages, such as mango juices (Duarte et al., 2002; Jha and Gunasekaran, 2010), apple purees (Lan et al., 2020c), apricot slurries (Bureau et al., 2009), pomegranate juice (Vardin et al., 2008) and grape juice (N. Shah et al., 2010), etc. In light of this, simultaneous rheometry coupled with *in situ* FTIR spectroscopy was used to obtain additional information concerning the sugar changes occurring during mango ripening. This innovative technique offers the possibility to perform both rheological and spectral measurements on the same sample while providing a twin spectral fingerprint and rheological indicator (storage and loss moduli in this case). Hence, the feasibility of using this coupled technique as a fast tool to determine (on a reduced sample size) the impact of ripening on the solid like-behavior and the sugar content of mango puree was evaluated in the following stage.

Amplitude sweep tests showed that for all mango purees, G' and G'' moduli were steady in the domain of low strain amplitude ($<1\%$), characterizing the linear viscoelastic region (LVE-R) with a $G' > G''$, indicating a predominance of a solid-like behavior in this region (Fig. 5). Thereafter, G' and G'' values declined and when a critical strain ($>1\%$) was reached, G'' exceeded G' , indicating a transition from a solid-like ($G' > G''$) to a viscous-like ($G'' > G'$) behavior. These observations are in accordance with literature reports that fruit purees are considered as viscoelastic fluids with both the viscous properties of a liquid and elastic properties of a solid (Espinosa Brisset, 2012).

Even if mango purees were characterized by a predominance of solid-like behavior within the linear viscoelastic region (LVE-R) for all ripening stages, the storage modulus G' of mango puree decreased significantly during the first 10 days of ripening before reaching steady values (Fig. 5). This is in line with conventional small deformation rheological measurements results highlighting the significant changes of viscoelastic properties of mango purees and their SIS mainly during the early ripening days (< 10 days).

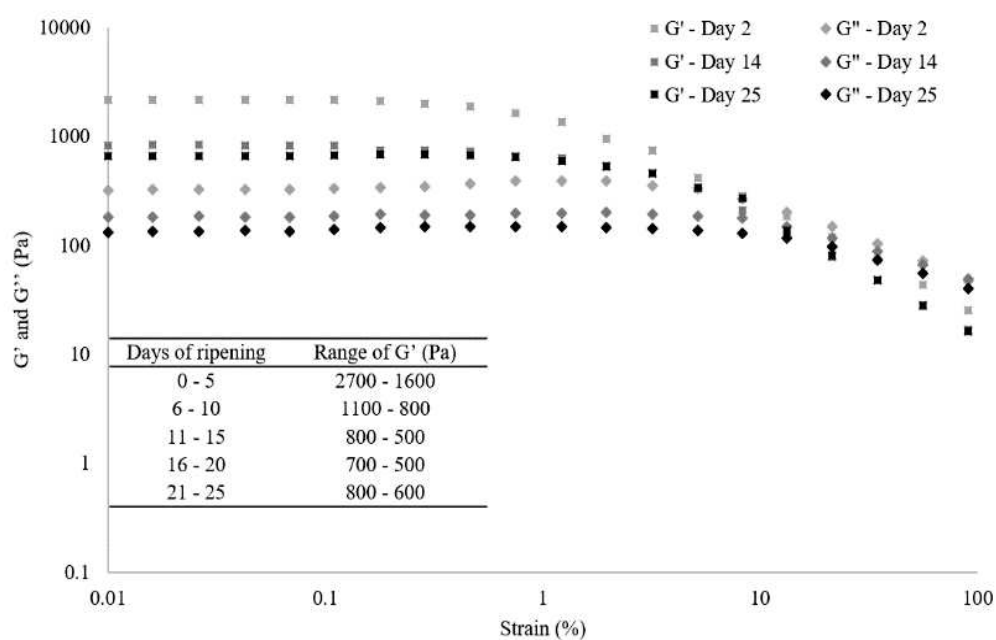


Fig. 5. Storage modulus G' and loss modulus G'' (Pa) of three mango purees at different days of ripening (day 2, 14 and 25) as a function of the strain γ (%) and the range of the storage modulus G' (Pa) for different ripening stages. All the given values are the average of three trials and all standard deviation values are less than 5% of the average value.

In this study, *in situ* FTIR spectra of mango puree were performed between 4000 and 650 cm^{-1} (Fig. 6). In these spectra, the 1200 - 960 cm^{-1} absorption zone, corresponding to a combination of bands associated with the stretching vibrations of C-C and C-O bonds, is the main region of

interest, since it is attributed to sugars and organic acids (Bureau et al., 2009; Cadet et al., 1997; N. Shah et al., 2010). In this work, sugars were easily identified in this region, unlike the main organic acids with weak signals (citric and malic acids at low concentration < 1%) (Medlicott and Thompson, 1985). The absorption bands at 1138 and 995 cm^{-1} are assigned to sucrose, at 1083 cm^{-1} to fructose and at 1103 cm^{-1} to glucose.

Principal Component Analysis (PCA) was performed only in the 1200 - 960 cm^{-1} region in order to assess the variation of sucrose, fructose and glucose content during ripening. As presented in Fig. 7 (a), about 96% of the total variance was explained by the first two components PC 1 (87%) and PC 2 (9%). The PCA of *in situ* FTIR spectra acquired on mango purees provided a visual indication of the change, during ripening, of mango puree sugars between the ripening stages before 10 days and after 10 days (Fig 7, a). The PC loadings (Fig 7, b and c) show the spectral variations responsible for this mango puree separation. The region between 1200 - 960 cm^{-1} , corresponding to total sugars content, was the main contributor of PC 1 with a positive correlation. The absorption bands at 1138 and 995 cm^{-1} , corresponding to the sucrose, are positively correlated to the second component with a smaller contribution of the band at 1103 cm^{-1} , corresponding to the glucose absorption. The band absorption at 1083 cm^{-1} , corresponding to fructose appears also to be a main contributor to PC 2 with a negative correlation. Hence, the second principal component (PC 2) clearly enables separation of the mango purees before and after 10 days of ripening, according to the change in their sucrose and fructose content. Indeed, mango purees obtained from the early ripening days (0 - 10 days), are mainly seen in the upper two quadrants, and were characterized by their higher sucrose content and their lower fructose content. Contrariwise, mango purees obtained after 10 days of ripening (11 - 25 days) appeared in the lower two quadrants due to their lower sucrose content and their higher fructose content. These results are in accordance with the literature, as several studies have reported that sucrose is the predominant synthesized sugar in mango during ripening, and its synthesis occurs mainly between day 6 and day 8 of ripening. As for fructose, its concentration doubles generally during the first 8 days of ripening as a result of sucrose hydrolysis (Castrillo et al., 1992; Medlicott and Thompson, 1985; Tandon and Kalra, 1983). The appearance along the first principal component (PC 1) axis of mango purees before and after 10 days of ripening did not allow any further separation of these purees in relation to total sugars content.

Based on simultaneous rheometry and *in situ* FTIR spectroscopy, it was possible to confirm that ripening led to a simultaneous decrease in the solid-like behavior of the mango purees, as

well as their sucrose content. After 10 days of ripening, a significant increase in the fructose content in mango purees was observed. This coupled technique could be interesting to monitor - in a quick and easy way while using the same sample - the rheological and the spectral changes occurring in fruits, not only during ripening but also during processing.

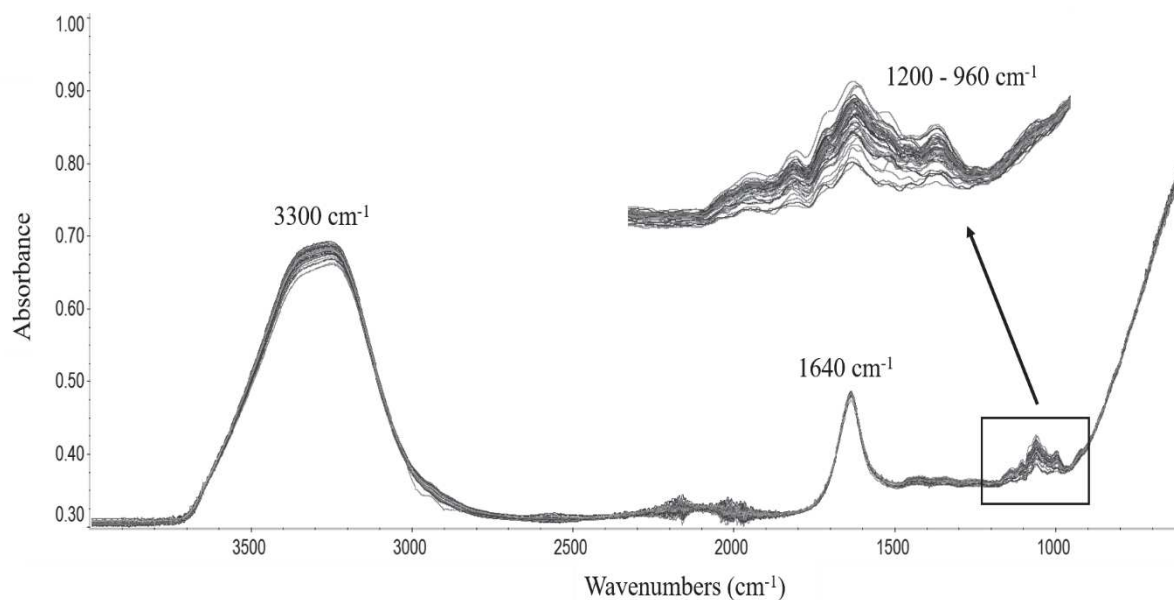


Fig. 6. *In situ* FTIR spectra ($4000 - 650 \text{ cm}^{-1}$) of mango purees.

D₅N

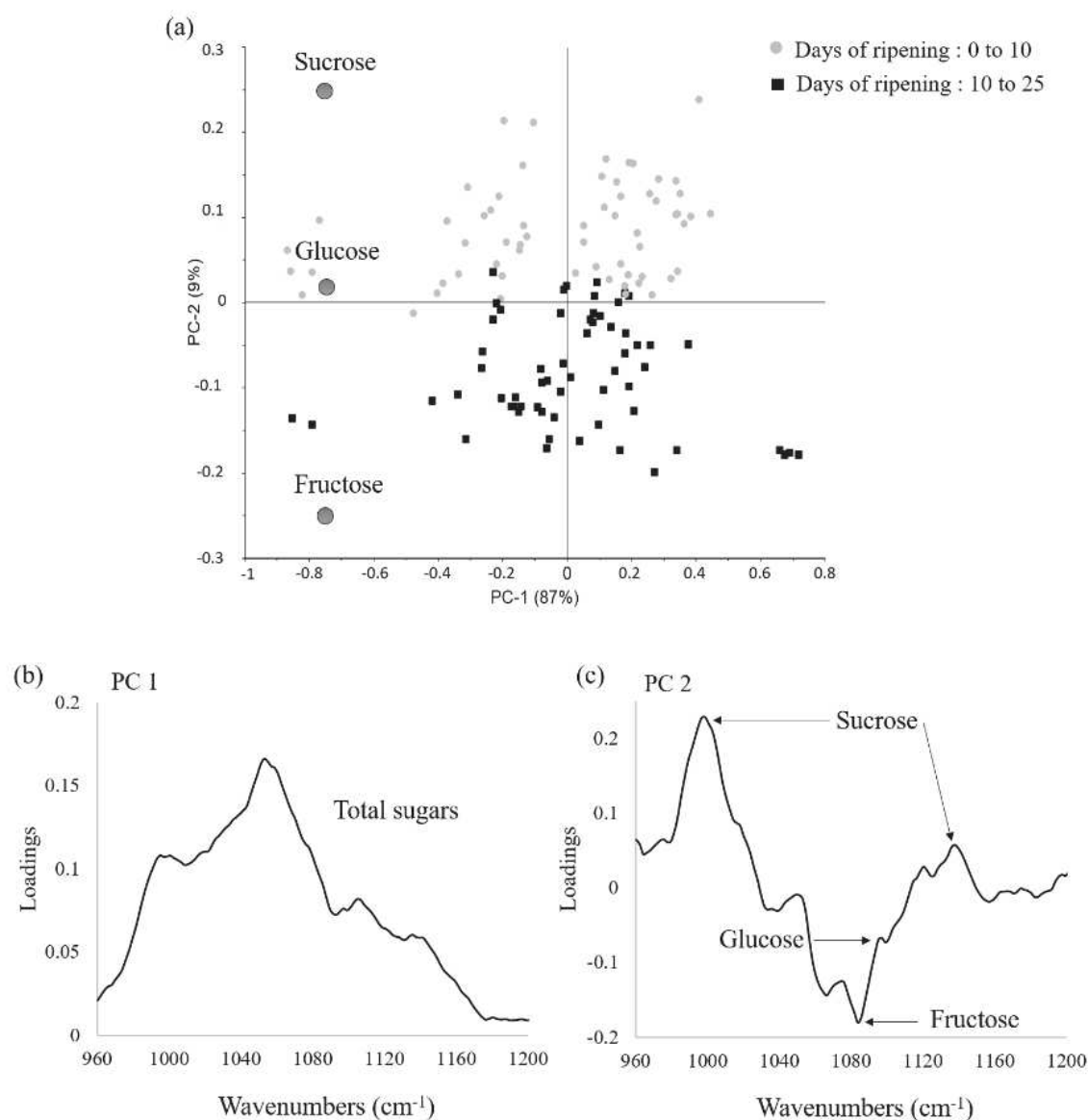


Fig. 7. (a) Score plots of the two first principal components PC 1 and PC 2 of mango purees, (b) and (c) the loadings plots of PCAs components PC 1 and PC 2 respectively, using *in situ* FTIR spectra between 1200 and 960 cm⁻¹.

Conclusion

This study proposed to investigate the impact of mango ripening on the physical properties of mango purees. An extensive study was performed to determine the particle size and the rheological properties of mango purees and their dispersed phase through particle size measurements and small deformation rheology. The feasibility of using simultaneous rheometry coupled with *in situ* FTIR spectroscopy as a fast tool to determine (on a reduced sample size) the impact of ripening on the solid like-behavior and on the sugar content of mango puree was evaluated. The results highlighted a sharp decrease in the size and the specific

cohesion energy of the mango purees' SIS, mostly during the 10 first days of ripening. Mango purees from early ripening days (< 10 days) were also characterized by their specific gel-structure with higher solid-like behavior and higher network strength (higher A' values (1206 - 436 Pa.sⁿ) and lower n'' values (0.16 - 0.22). The higher n' and n'' values obtained for mango purees from ripening stages beyond 10 days revealed also a higher frequency dependency of the viscoelastic moduli (G' and G'') for these mango purees, confirming their weaker gel behavior.

These results showed the important impact of changes occurring during the first 10 days of mango ripening on the specific rheological and the particle size properties of their purees.

Simultaneous rheometry and *in situ* FTIR spectroscopy measurements performed on the mango purees highlighted the simultaneous decrease in solid-like behavior and the sucrose content, and the significant increase in the fructose content of mango purees after 10 days of ripening. This innovative technique could be interesting to monitor - in a quick and easy way - the rheological and the spectral changes that might occur in mango during ripening. The experimental strategy and the innovative simultaneous rheometry and *in situ* FTIR spectroscopy proposed in this work could be also used for other fruits to monitor the impact of ripening, as well as processing, on the properties of fruit-based suspensions properties.

1.2.2 Bilan de l'étude

L'approche proposée nous a permis de comprendre l'effet de la maturation des mangues sur les propriétés physiques et biochimiques des purées. Les indicateurs pertinents caractérisant les propriétés des purées ont pu être identifiés et ce en lien avec le stade de maturation des mangues. Nous avons également mis en évidence que les changements de ces propriétés ont lieu surtout au cours des 10 premiers jours de maturation, dans les conditions expérimentales adoptées dans cette étude (18°C, 80% HR).

La stratégie expérimentale proposée, qui a ainsi permis d'identifier les différents indicateurs des propriétés des purées, repose principalement sur des outils de pointe très peu accessibles dans les unités de transformation des mangues dans les pays du Sud.

Or, un tri efficace des mangues dans les unités de transformation devrait reposer sur un outil facile et rapide à mettre en œuvre et idéalement non-destructif. À ce jour, le tri des mangues destinées à la transformation s'effectue de façon manuelle et artisanale en se basant principalement sur le savoir-faire des opérateurs. Ce tri, basé sur une évaluation visuelle et

tactile, est très subjectif et constitue un vrai verrou entraînant, dans certains cas, une qualité disparate des produits transformés.

Dans ce contexte, dans la deuxième partie du travail, nous nous sommes intéressés à la mise en place d'un outil instrumental non-destructif permettant non seulement de trier les mangues selon leur stade de maturation mais aussi d'anticiper certaines propriétés physiques et physico-chimiques des purées.

1.3. Développement et mise en place d'un test non-destructif pour le suivi de la maturation de la mangue et pour l'anticipation des propriétés physiques et physico-chimiques des purées

Pour atteindre l'objectif ciblé, une stratégie expérimentale combinant des analyses physiques (rhéologie et texture) et physico-chimiques (taille des particules, couleur, pH, acidité titrable, extrait sec soluble, matière sèche) a été proposée pour caractériser les mangues fraîches et leurs purées à différents stades de maturation. Des analyses statistiques ont été effectuées par la suite pour rechercher des corrélations pertinentes entre les différents paramètres étudiés et proposer ainsi un outil de tri pertinent.

L'ensemble de ces résultats est présenté ci-après sous la forme d'un article publié dans *Food and Bioproduct processing*, intitulé *Innovative non-destructive sorting technique for juicy stone fruits : textural properties of fresh mangos and purees* (Labaky et al., 2020).

1.3.1 Innovative non-destructive sorting technique for juicy stone fruits: textural properties of fresh mangos and purees.

(Labaky, P. et al., Food and Bioproducts Processing Volume 123, September 2020, Pages 188-198) <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.013>

Abstract

Mango has an abundant production leading to important post-harvest losses. Mango processing is an alternative to reduce these losses. Nowadays, the lack of instrumental tools suitable to sort mangos according to their ability to be processed into products with specific quality is a main setback for their processing. The aim of this study was to develop new tools, mainly non-

destructive, to sort easily fresh mangos according to their maturity stage and to the specific properties of their purees. To this end, an innovative experimental strategy combining textural, rheological and physico-chemical analyses was proposed to characterize mangos and their purees. Results showed that mango firmness is a great indicator of mango heterogeneity and has an important impact on the properties of mango purees. A non-destructive compression test was reliable to measure accurately mango firmness and to anticipate rheological and particles size properties of mango purees.

Keywords: Mango, purees, texture, rheology, maturity, sorting tool

Highlights

- Non-destructive compression test is a reliable to measure mango firmness
- Non-destructive compression test allows tracing-back mango solid-like behavior
- Prediction of the particles size of mango purees based on mango firmness
- Anticipation of rheological properties of mango purees based on mangos firmness
- Discrimination of three groups of mango and purees according to their properties

Introduction

Mangifera indica L. known as mango, is a tropical fruit originated from the Indo-Burmese region. Mango is one of the most produced (mainly in India, China, Thailand, Indonesia and Pakistan) and consumed fruits worldwide after banana (Chantalak and Robert E, 2017; Masud Parvez, 2016). There is a large variety of mangos that differ in size, color, texture, and nutritional properties. The most consumed mangos varieties are Kent, Keitt, Haden, Tommy Atkins, Cogshall, Alphonso, Amelie and Valencia pride (Djioua et al., 2010).

According to the FAO statistics, mango production worldwide increased by 26 million metric tons over a period of 17 years to reach 50 million metric tons in 2017 (2019 FAO, 2019). In developing countries, post-harvest fruit losses due to the abundant mango production can be estimated up to 40% (Boateng, 2016; Memon et al., 2013). Hence, processing and transforming mangos into purees, juices, jams, canned products and dried slices (Evans et al., 2017) is an alternative not only to minimize post-harvest losses but also to provide local incomes. Nevertheless, the quality of processed products (physical, physico-chemical and organoleptic characteristics) depends on the maturity stage of raw mangos (Ellong et al., 2015). Indeed, the heterogeneity of the maturity stages encountered in a same batch of mangos for processing

constitute a barrier for controlling the process and the quality of the finished product (Rivier et al., 2009)

In the light of the above, fruit sorting prior to mango processing is generally performed in processing units to reduce batch heterogeneity in relation with maturity stages. To date, mango sorting is mainly manual, time consuming and highly labor-dependent (visual and tactile know-how) leading in some cases to inaccurate fruits sorting and disparate quality of processed products. Several tools (e.g. textural, spectral, fluorescence and biochemical measurements) have been evaluated to predict the maturity stage or the quality of mango fruits (Pronprasit and Natwichai, 2013; Valente et al., 2011; Zakaria et al., 2012). However, as far as the authors are aware, in these studies, none of the proposed tools were conceived as to predict the quality of processed products.

Nowadays, the lack of instrumental tools suitable to sort mango fruits according to their ability to be processed into products with specific quality is a main setback for up-grading mango fruits. In this context, the aim of this work was to develop new methods and tools, mainly non-destructive, allowing to sort mangos according not only to their maturity stage but also to the specific properties of their processed products (puree). To this end, an experimental strategy combining mechanical (rheology and texture), physical and physico-chemical (particles size measurement, color, pH, titratable acidity, °Bx, dry matter) analyses was proposed to characterize fresh mangos and mango purees. Firstly, textural (penetrometry and compression), rheological (oscillatory), physical (weight, density) and color analyses were performed on fresh mangos at different stages of maturity. In a second place, fresh mangos were processed into purees that were characterized (particles size, rheology and physico-chemistry). Finally, statistical analyses were used to (i) identify pertinent instrumental indicators that describe the maturity stages of mangos, (ii) evaluate the impact of mangos maturity stage on purees characteristics and finally to (iii) propose new tools for sorting fresh mangos according to their ability to be processed into purees.

Materials and methods

Fruits

Fifty green mangos (*Mangifera indica* L., cv. Kent, Peru) previously stored at 10°C during 10 days (to slow down maturation) were purchased from a local warehouse (Georges Helfer SA, Plan d'Orgon, France). All mangos were stored in controlled conditions (18°C, 80% RH) between one and twenty-five days. Daily, one or two fruits were characterized. Each mango

was transformed separately into puree and all measurements were carried out on the same fruit and its puree. Data of twenty-eight mangos were selected for this study.

Fresh mango characterizations

Before the analyses, mango fruits, were soaked in chlorinated water (200 ppm sodium hypochlorite, Chem-Lab, Zedelgem, Belgium) and wiped with 70% ethanol (Honeywell, Riedel-de Haën, absolute, ≥ 99.9 , Charlotte, North Carolina, USA) in order to remove the latex layer that covers the fruits (Palafox-Carlos et al., 2012; Penchaiya et al., 2015).

Fruit density

Fruit density was calculated using Archimedes' principle by measuring the fresh fruits mass in air and in water (each mango was placed in a basket hanging from the balance and fully immersed in water) according to the method described by Joas et al., 2009 (Joas et al., 2009).

Texture analysis

Firmness of mangos was measured using a texture analyzer (TA-XT2, Stable micro Systems, London, UK) equipped with a 5 kg load cell and an Exponent software (version 5.1.1.0) to record data.

Two different methods were evaluated: a non-destructive compression test and a destructive penetrometry test.

Non-destructive compression test

The compression test in this study was proposed to simulate the tactile perception of the operator during sorting mango fruits according to their firmness. Compression tests were performed on both larger sides of mango since water potential of the two sides may differ due to the position of the fruit on the tree and to its exposition to the sun. Measurements were performed on three different positions on each side of the fruit. The test was carried out to reach a maximum compression force of 10 N with a 2 cm spherical probe and probe speed of 1 mm.s⁻¹. The maximum force was carefully chosen in order to avoid damaging the fruit structure and subsequently proposing a non-destructive test. The obtained force-distance curves were recorded and the distances of compression (D_{5N} or D_{10N}) at 5 or 10 N were identified as the most consistent parameters to describe mango firmness. Similar results of D_{5N} and D_{10N} values were recorded regardless the side of mango ($R^2 > 0.99$) for linear correlations of D_{5N} data and

D_{10N} data for side 1 and side 2 (data not shown). Considering this observation, results concerning compression tests will be presented only for D_{5N} and for one side in the following.

Destructive penetrometry test

Penetrometry test was performed on slices (h=15 mm, using an electric ham slicer generally used for processed meat) from each side of mango using a cylindrical stainless steel probe of 5 mm diameter. The test was carried out on the inner flesh tissue to reach a maximum distance of 5 mm with a probe speed of 1 mm.s⁻¹. The aim of this additional test was to evaluate the firmness of the mango flesh in a destructive way as it is conventionally done. The firmness of mangos was evaluated by the average of the maximum value of the peak force (F_{max}) of the resulting force-distance curves. Measurements were realized on three different positions of the slice.

Rheological measurements

Rheological measurements were carried out on cylindrical mango slices (2 mm thickness and 35 mm diameter) cut using an electric ham slicer generally used for processed meat.

Rheological measurements were performed using a Haake Mars 60 rheometer (ThermoFisher, Waltham, Massachusetts, USA) equipped with a 35 mm serrated parallel plates geometry and a “RheoWin” software (version 4.82.0002) to record rheological data. A strain amplitude sweep test was performed in low strain amplitude range (from 0.01 to 1%) at a constant frequency of 1 Hz and a controlled normal force of 4 N. All experiments were conducted at temperature of 25°C ± 0.1°C controlled by a Peltier system. The storage modulus values G'(Pa) at 0.1% of strain were selected as rheological indicator reflecting the solid-like behavior of mango slices. Measurements were performed in quadruplicate.

Flesh color

Color was determined on grinded flesh using a Minolta CR-300 colorimeter (Konica Minolta Sensing, Inc, Ramsey, New Jersey, USA) according to the CIELAB color system (L*, a*, b*). L* represents the lightness varying from 0 to 100, (0 representing black and 100 representing white), a* represents the variation from green (-) to red (+) and the b* reflects the variation from blue (-) to yellow (+).

Characterization of mango puree

Puree preparation

Each mango was manually peeled, the seed was removed and the flesh was cut into small pieces (around 1 cm³). The flesh was grinded at 25°C with a Thermomix (Vorwerk, Typ 31-1, Wuppertal, Germany) at a speed of 1000 rpm for 1 min, 7000 rpm for 1 min and 10000 rpm for 2 min. After grinding, the puree (approximately 180g) was stored at 4°C before the analyses.

Rheological measurement

Rotational measurements

Rotational measurements of mango purees were performed using a Physica MCR301 rheometer (Anton Paar GmbH, Graz, Austria) equipped with “Start Rheoplus” software (version RHEOPLUS/32 V3.40) to record the rheological data. A six blades vane geometry (ST22- 6V-16, radius of 22 mm) was used with stationary cup with a radius of 27 mm giving a gap of 2.5 mm. The shear rate varied from 0.1 to 500 s⁻¹ and temperature was held at 25°C ± 0.1°C using a Peltier system. The evolution of dynamic viscosity μ (Pa.s), of each mango puree, as function of the shear rate $\dot{\gamma}$ (s⁻¹) was recorded.

Oscillatory measurements

Strain amplitude sweep tests were conducted using the Haake Mars 60 rheometer equipped with a 35 mm serrated parallel plates geometry. Frequency was held constant at 1 Hz, while strain amplitude varied between 0.01 and 100%. All experiments were conducted at a temperature of 25°C ± 0.1°C controlled by a Peltier system. For each puree, the storage and loss moduli G' and G'' were recorded as function of the strain (%). The values of the storage G' (Pa) and loss G'' (Pa) moduli (at 1% of strain in the linear viscoelastic domain) were selected as rheological indicators reflecting the solid-like behavior and liquid-like behavior of mango purees, respectively.

Particles size measurements of suspended insoluble solids

Particles size distribution was determined by LASER diffraction using a Malvern Mastersizer (Mastersizer 3000, Malvern Instruments Limited, Worcestershire, UK). This particles size analyzer can provide theoretically particles size distribution from 10 nm to 3500 μ m. Measurements were carried out in a wet-mode using distilled water as the suspension medium.

The values 1.73 and 1.33 were used for the refractive indices of cloud particles and dispersion phase (water), respectively, and 0.1 was used for the absorption index of cloud particles (Dahdouh et al., 2016). Samples were introduced into the volume presentation unit, which already contained deionized water (obscuration of 20%). In this unit, the diluted sample was stirred at 1500 rpm and pumped through the optical cell. The initial particles size distribution of puree was verified to be not modified in such conditions of stirring and pumping. For each measurement, size distribution (volume density against particles size) was provided and statistical volume diameters, D_{10} , D_{50} and D_{90} were given (D_x indicates a particles size for which x% of the particles are below that size). The surface area average diameter $D [3;2]$ (Sauter mean diameter) and the volume mean diameter $D [4;3]$ (Brouckere mean diameter) were also provided (Dahdouh et al., 2015).

The $D [3;2]$ indicates the diameter of a sphere that has the same volume/surface ratio as the set of particles Eq. (1):

$$D [3;2] = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2} \quad (1)$$

The $D [4;3]$ indicates the diameter of a sphere whose volume is equal to the average volumes of all the particles in the sample Eq. (2):

$$D [4;3] = \frac{\sum_i n_i d_i^4}{\sum_i n_i d_i^3} \quad (2)$$

With n_i the number of particles of diameter d_i .

Particles size measurements performed separately on mango purees and on their isolated suspended insoluble solids (centrifugation 18000 g /30 min) provided identical particles size distributions, smaller compounds being not detectable in the Mastersizer operating conditions. Hence, results presented in this work concern mainly the particles size distribution of suspended insoluble solids ($> 1\mu\text{m}$) of purees.

Physico-chemical analyses

Mango is a climacteric fruit for which biochemical and nutritional changes occurring during tree-ripening can continue after harvesting. Titratable acidity (TA), total soluble solids (TSS) and dry matter (DM) were performed on purees according to protocols and methods used for fruit suspensions (Dahdouh et al., 2016). pH and titratable acidity were measured using an automatic Titroline apparatus (Schott Schweiz AG, St. Gallen, Switzerland). Titratable acidity

was assessed by titration with 0.025 N NaOH until a pH 8.2. Titratable acidity (TA) was expressed in g of citric acid /100 g of puree since it is well known that citric acid is one of the major organic acids present in mango contributing to fruit acidity and flavor. Total soluble solids (TSS, expressed in °Bx) were measured with an Abbe refractometer (Atago, Japan). Dry matter (DM, expressed in g/100 g of puree) was determined by drying 3 g of puree at 70°C under vacuum for 24 h.

For all physico-chemical analyses, measurements were performed at 25°C in triplicate and the average values were used.

Statistical analyses

Multivariate analyses were carried out using XLSTAT (version 16.0.4744 Addinsoft, Paris, France). Principal component analysis (PCA), a multivariate projection method designed to reduce the dimensionality and to describe the variation of the data (Azira et al., 2014), was performed to analyze the total variability between samples and to identify groups with similar characteristics among fresh mangos and puree. Eight indicators for fresh mango ($F_{\max}$, D_{5N} , G' , L^* , a^* , b^* , weight, density) and twelve indicators for purees (particles size: $D [3;2]$, $D [4;3]$, D_{10} , D_{50} , D_{90} ; rheological behavior: G' , G'' , K , n and physico-chemical characteristics: TA, TSS and DM) were set as variables. The score plot was extracted from the first two principal components, PC 1 and PC 2, as they presented the maximum variability of the data.

Results and discussion

Fresh mangos

Texture characterization

Results regarding compression test are presented in Fig. 1(a). The distance achieved by the probe when applying 5 N (D_{5N}) on the raw mango increased significantly with maturation highlighting a significant loss of mango firmness. The loss of firmness of fruits occurring during the maturation period could be due to biochemical changes such as the degradation of pectins, cellulose and hemicellulose (Lawson et al., 2019; Padma et al., 2011; Yashoda et al., 2006).

Fig. 1(b) shows that the force ($F_{\max}$) needed to puncture 15 mm of mango slice decreased significantly during maturation confirming the loss of firmness. However, penetrometry test seems to be less discriminating regarding mango firmness than compression test after 15 days of maturation. Indeed, a significant decrease of $F_{\max}$ (92%) was observed before 15 days of

maturation whereas beyond this maturation stage the $F_{\max}$ was almost steady. After 15 days, the difference of the flesh firmness was not high enough to be detectable by the penetrometry test. Contrariwise, in the case of compression test, the firmness of the whole fruit (peel and flesh) was measured, leading to better results.

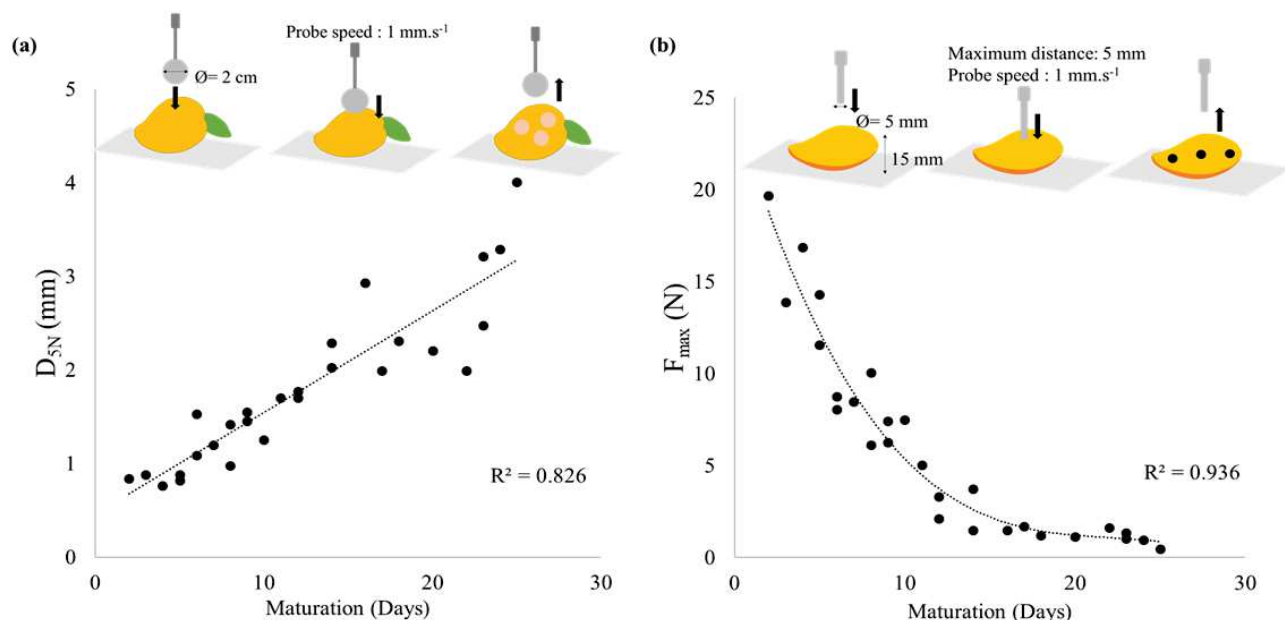


Fig. 1. Evolution of (a) D_{5N} (mm) and (b) $F_{\max}$ (N) during maturation.

Rheological characterization

Since texture tests showed that the firmness of mango flesh decreased during maturation, rheological measurements were performed to assess the evolution of the solid-like behavior of mango flesh in relation with firmness loss during maturation. To this end, the storage modulus G' (Pa) reflecting the solid-like behavior of a material was evaluated through oscillatory test in small amplitude range (0.1 to 1%) within the linear viscoelastic range (Lee, 2018).

Fig. 2 (a) depicts the evolution of the storage modulus G' (Pa) as function of maturation days showing that the solid-like behavior of mango flesh decreased significantly during maturation. Indeed, the storage modulus of mango slices at the end of maturation was 10 times lower than the one recorded for green mango at early maturation stages. This observation emphasizes that biochemical and physico-chemical phenomena (starch, cell wall, cellulose and hemicellulose degradation, etc.,) (Nambi et al., 2016) occurring during maturation led to a modification of the viscoelastic properties of mango flesh and subsequently to its loss of firmness.

Moreover Fig. 2 (b) and (c), point up interesting correlations between the solid-like behavior (G') of mango flesh and the firmness of mango flesh ($F_{\max}$) and the firmness of the whole fruit

(D_{5N}). It is important to notice that the D_{5N} is a better indicator than $F_{\max}$ regarding the solid-like behavior of mango flesh at stages of maturation above 10 days (when $F_{\max} < 5$ N), Fig. 2 (b) and (c). This result confirms that it is possible to trace back the solid-like behavior of mango flesh by performing a simple and non-destructive compression test on the whole fruit.

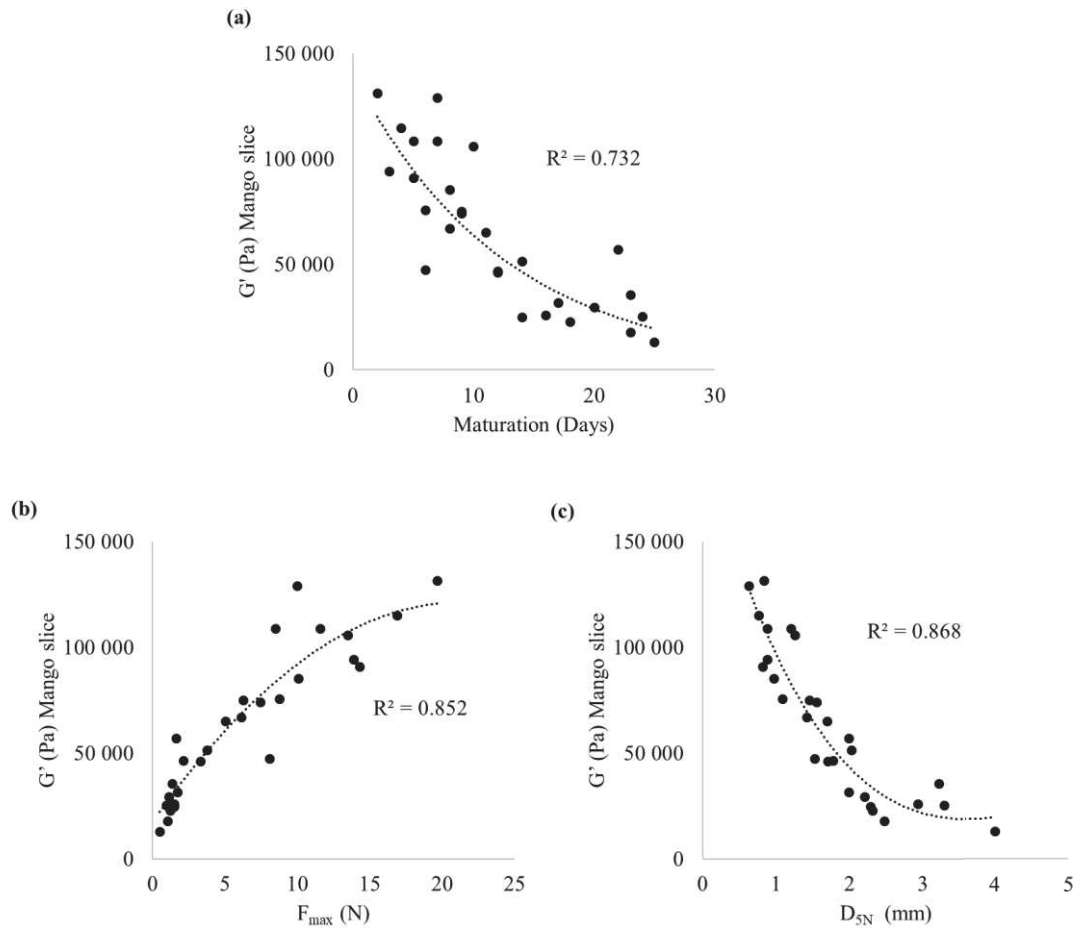


Fig. 2. Evolution of the storage modulus G' (Pa) of mango slices as function of (a) maturation (days), (b) $F_{\max}$ (N) and (c) D_{5N} (mm).

To sum up, both penetrometry (destructive) and compression (non-destructive) tests allowed to measure significant loss of mango firmness during maturation. Compression test provided better information about mango firmness after 15 days of maturation without damaging the fruits. Moreover, this simple and non-destructive compression test makes possible to trace back the solid-like behavior (G') of mango flesh, since D_{5N} is a good indicator of the solid-like behavior of mango flesh even at stages of maturation above 15 days.

Other physical characterization: flesh color, fruit weight and density

Fruit weight, density and flesh color, were measured during maturation in order to assess the effect of maturation on these physical and physico-chemical characteristics of mangos (Gentile et al., 2018; Lawson et al., 2019).

Fruit density decreased during maturation as presented in Fig. 3(a). A weight loss of mango fruits during maturation is mentioned by Lawson et al., 2019 and explained by the loss of water through the stomata and pores (Lawson et al., 2019).

Concerning color, the variation of three parameters L^* , a^* and b^* is generally used to monitor the variation of flesh color. The decrease of the lightness L^* point up a darkening of fleshs during maturation due to the activity of the polyphenol oxidases forming brown pigments (Liu et al., 2013). The increase of a^* and b^* reveal biochemical changes (formation of carotenoids, chlorophyll degradation, etc.) during maturation (Lawson et al., 2019; Liu et al., 2013; Romainum et al., 2018). In this study, the obtained results, Fig. 3 (b), (c), were similar to those previously reported by many authors regarding L^* (L^* was 1.2 times lower at the end of the maturation) and a^* (a^* was 7.4 times higher at the end of the maturation), but no significant evolution of b^* was observed (Data not shown).

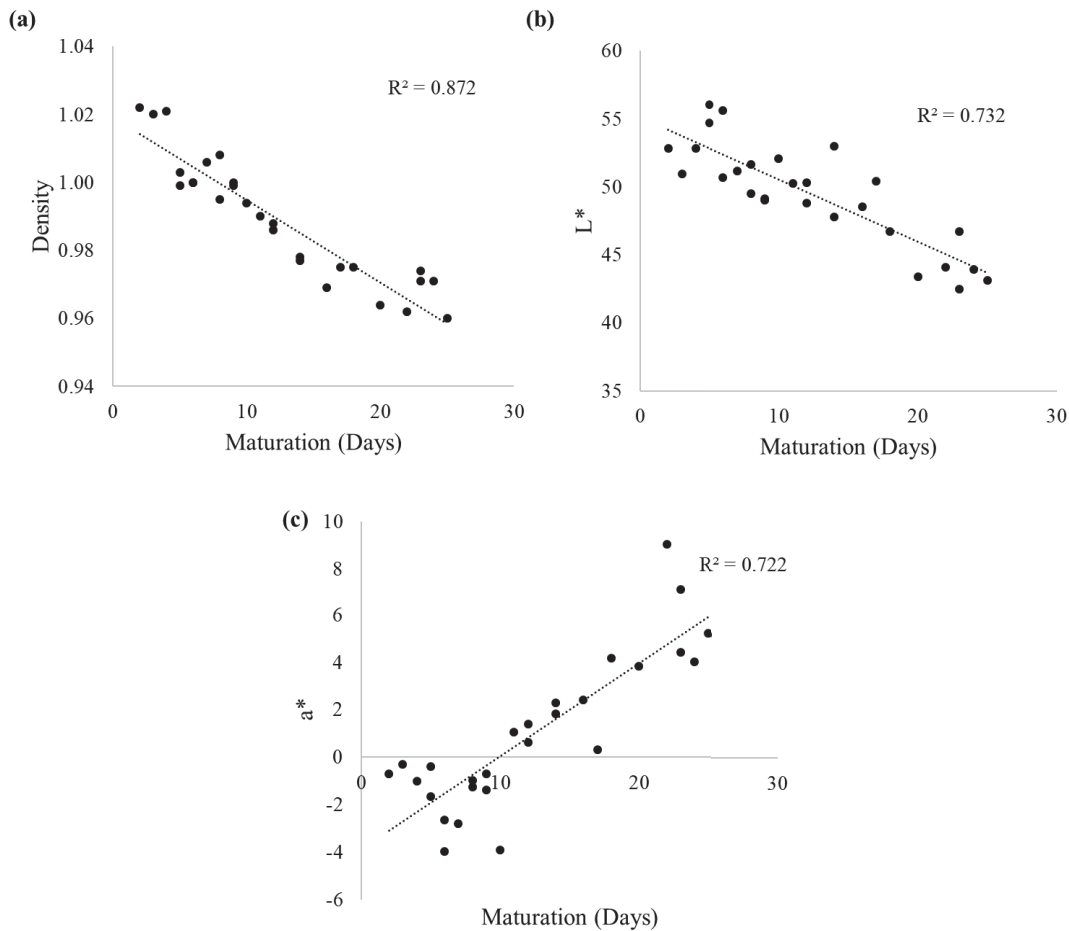


Fig. 3. Evolution of (a) density, (b) and (c) L^* and a^* (color parameters) during maturation (days).

Mango puree characterization and relations with fresh mangos characterization

Particle's size of suspended insoluble solids

Fruit suspensions consist in two phases: a serum phase containing soluble compounds such as sugars, acids and soluble pectins and insoluble phase containing insoluble suspended solids such as pectins, fibers and cell walls fragments (Lopez-Sanchez et al., 2012). For fruits-based suspensions, it is well known that the concentration and the size of insoluble suspended solids have a major role in the structural and rheological characteristics of these products (Dahdouh et al., 2016). Therefore, particles size measurements were performed on mango purees to assess the size distribution of their suspended insoluble solids in relation with mango maturation stage and puree rheological properties. Fig. 4 presents examples of particles size distributions for mango purees at 5 different days of maturation. These distributions are typical of polydisperse suspensions with a monomodal size distribution as reported in the literature for many fruits

suspensions such as apple purees and fruit juices (Dahdouh et al., 2016; Leverrier et al., 2016). It can be noticed that purees obtained from the greenest stage were characterized by the higher volume density for particles around 1000 μm . The volume density of these particles larger than 1000 μm decreased considerably as the stage of maturation increased to disappear in late stage of maturation. For purees obtained from mango beyond 10 days of maturation, the highest volume density for particles shifted from 1000 μm to 200 μm . Changes in particles size in purees in relation with mango maturation were also highlighted by the evolution of the statistical diameters as they all decreased significantly with maturation, Fig. 5 show some examples of the evolution of D_{10} , D_{50} and $D_{[3;2]}$ during maturation. Results concerning D_{90} and $D_{[4;3]}$ were not depicted in this section as they provided redundant information, they will be presented only in the statistical analyses.

This observation could be explained by the hydrolysis and degradation, during maturation, of large insoluble suspended solids (starch, pectins and cell walls) into smaller compounds leading to a decrease of the size of suspended insoluble particles (Venkatesan and Tamilmani, 2013). These results show that the loss of mango firmness and the hydrolysis of specific compounds (e.g. cell walls) during the maturation could lead to mango purees with smaller particles size.

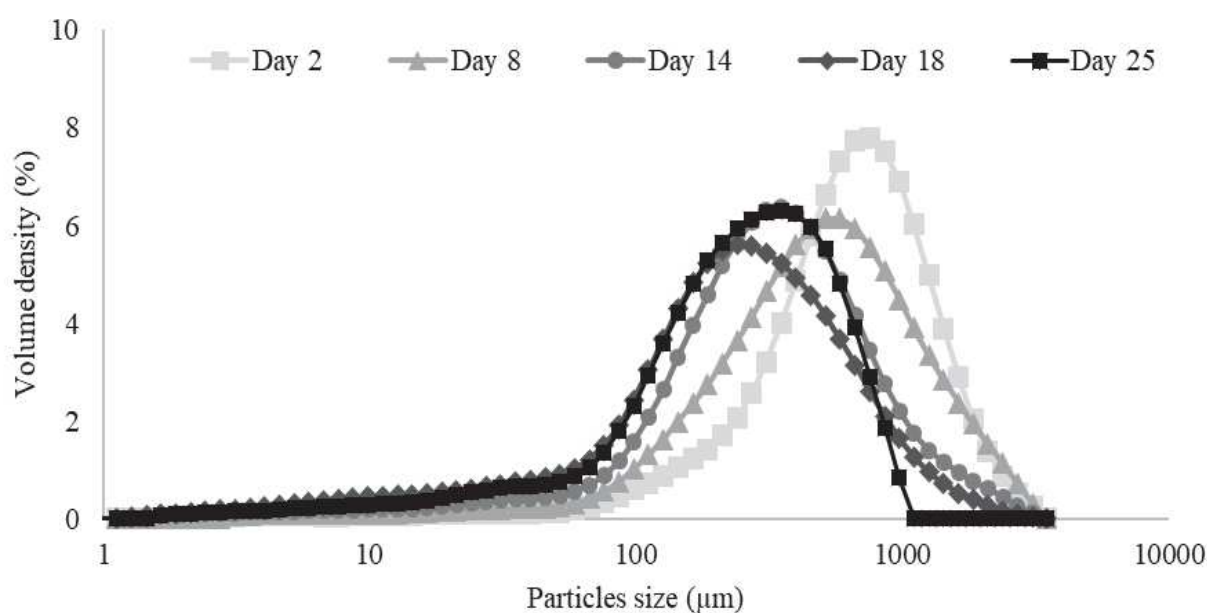


Fig. 4. Particles size distributions of mango purees at 5 different days of maturation.

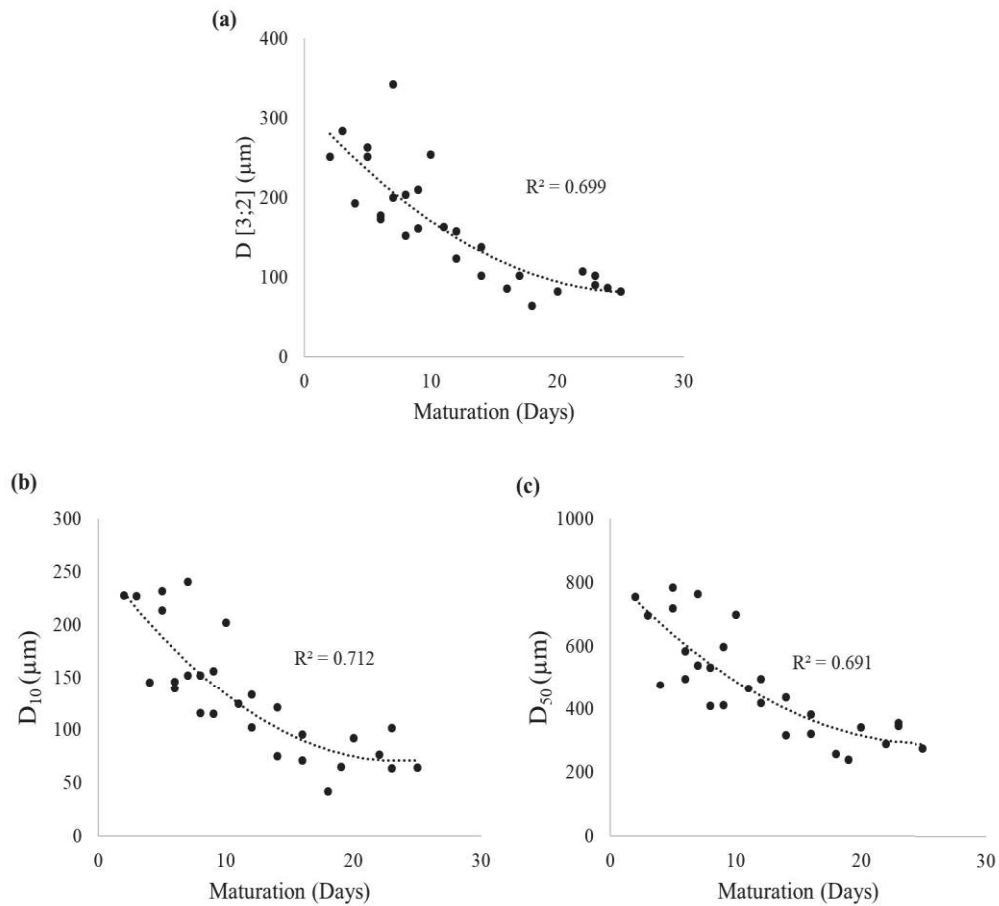


Fig 5. Effect of maturation on (a) D [3;2] (μm), (b) D₁₀ (μm) and (c) D₅₀ (μm).

Indeed, Fig. 6 (a), (b) point up significant correlations between the average surface diameter D [3;2] of the purees and the firmness of mango flesh ($F_{\max}$) and the whole fruit (D_{5N}). These observations emphasize the impact of mango firmness on the particles size distribution of the puree. Moreover, the same trend is observed between the average surface diameter D [3;2] and the storage modulus G' of mango flesh on Fig. 6 (c), showing that particles size distribution of mango puree is closely dependent on the solid-like behavior of mango flesh. In fact, purees grinded from the greenest mangos with a higher storage modulus G' of the flesh presented purees with larger particles. Since it is well known that grinding conditions have an important impact on the particles size distribution of purees (Espinosa et al., 2011), standardized conditions of grinding were carefully used in this work, for all stages of maturation, allowing to show the specific role of mango firmness and solid-like behavior on the particles size of the purees. Hence, this work proposes for the first time a simple and fast tool to predict the particles size of mango purees (obtained in specific conditions) based on a non-destructive compression

test (D_{5N}), since the same trends were observed when destructive texture and rheological analyses were performed.

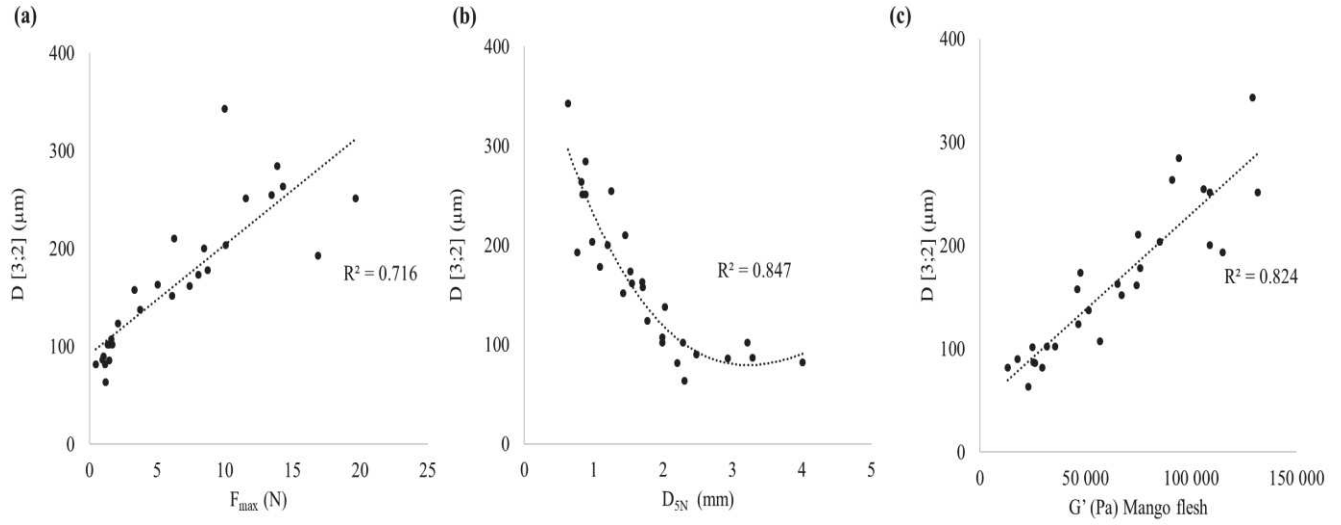


Fig. 6. Variation of the average surface diameter $D [3;2]$ (μm) with (a) F_{max} (N), (b) D_{5N} (mm) and (c) G' of mango flesh (Pa).

Rheological characterization

Rotational measurements

The effect of maturation on the flow behavior of mango purees was investigated throughout the measurements of the viscosity of different mango purees. Several published studies, reported that fruits purees are characterized by shear-thinning behavior as their viscosity decreases with the increase of the shear rate (Espinosa-muñoz et al., 2013; Gundurao et al., 2011; Phaokuntha et al., 2014). Since all mango purees had also shear-thinning behavior in this study, a power Law (specific of this behavior) was used to determine the consistency index (K , Pa.s^n) and the flow behavior index (n) of each puree (with significant determination coefficient R^2 , for $\alpha = 5\%$, degree of freedom = 27), Eq. (3):

$$\text{Power Law: } \mu_{\text{mod}} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

Where, μ_{mod} , the modeled viscosity (Pa.s), K , the consistency index (Pa.s^n), n , the flow behavior index and $\dot{\gamma}$ the shear rate (s^{-1}).

Table 1 summarize the ranges of variation of K , n and μ the experimental viscosity at 50 s^{-1} of mango purees at different stages of maturity. To ensure the clarity of results concerning

rheological properties of purees, authors presented results according to 5 stages of maturity, *a priori* ([0-5 days], [6-10 days], [11-15 days], [16-20 days], [21-25 days]). As expected, shear-thinning behavior of all purees was confirmed by the flow behavior indexes as they presented all values below 1 ($n < 1$). It can be noticed that the flow behavior indexes (n) decreased clearly as the maturation stage of mango increased whereas the consistency indexes (K) and the dynamic viscosity (μ) noticeably decreased only when comparing purees at very early and other stages of maturation. Indeed, consistency indexes were higher when considering purees at maturity stage between 0 and 5 days and slightly decreased for the other maturation stages. All these results highlight the effect of the fresh mango maturation on its puree's viscosity. This is in line with the hydrolysis of protopectins, a binding substance between cell walls and the degradation of starch, etc. (Sánchez-gimeno, 2009) occurring during maturation and inducing a decrease of the size of suspended insoluble particles, thus, leading to a decrease of the viscosity of mango puree (Espinosa et al., 2011).

Maturity stages (Days)	Range of variation of the flow index n	Range of variation of the consistency index K (Pa.s ⁿ)	Range of variation of the viscosity μ (Pa.s)
0 - 5	0.08 - 0.14	77 - 140	2.28 - 3.69
6 - 10	0.08 - 0.11	81 - 118	1.95 - 2.67
11 - 15	0.07 - 0.13	75 - 105	2.08 - 2.44
16 - 20	0.05 - 0.08	77 - 94	2.04 - 2.60
21 - 25	0.04 - 0.07	73 - 83	1.78 - 2.24

*For all data the given are the average of three trials and all standard deviation values are inferior to 5% of the average value.

Table 1. The ranges of variation of K , the consistency index (Pa.sⁿ), n , the flow behavior index and μ (Pa.s) the experimental dynamic viscosity at 50 s⁻¹ of mango purees.

Fig. 7 point up a decreasing trend between the experimental dynamic viscosity at 50 s⁻¹ (μ) of mango puree and the firmness of the whole fruit (D_{5N}) mainly when comparing early maturation stages [0-5 days] and [6-10 days] with the other stages. This observation emphasizes the impact of mango firmness at early stages of maturation not only on particles size of purees but also on their viscosity even if the correlation between μ and D_{5N} is not as good as for D [3;2].

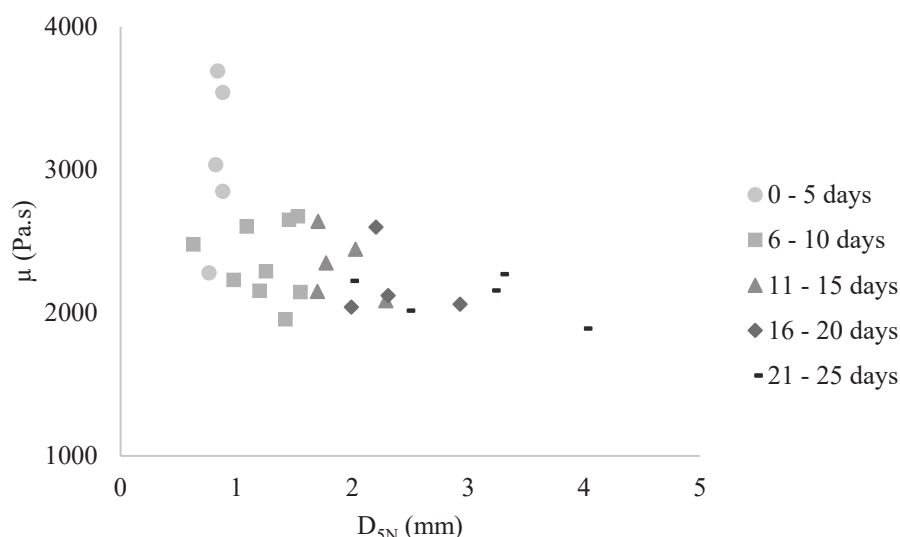


Fig. 7. Variation of the experimental dynamic viscosity μ at 50 s^{-1} (Pa. s) as function of the D_{5N} (mm).

Oscillatory Strain Sweep

The viscoelastic behavior of different mango purees was evaluated through an oscillatory strain sweep test. For all purees the storage modulus G' and the loss modulus G'' were constant in the domain of low strain amplitude ($< 1\%$) and characterized a linear viscoelastic region (LVE-R). In this region, the storage modulus was higher than the loss modulus, showing a viscoelastic solid-like behavior. This behavior was independent of the maturity stage since all purees showed similar trends. G' and G'' values declined and when a specific strain was reached, G'' exceeded G' indicating a transition from a solid-like ($G' > G''$) to a viscous-like ($G'' > G'$) behavior and a dependency of the rheological properties of purees on the strain. These results showed that, all purees can be considered as viscoelastic solids in the domain of low strain amplitude ($< 1\%$) and viscoelastic liquids for higher strain amplitude.

Although, all purees showed a viscoelastic solid-like behavior, a decrease in the storage modulus G' within the linear viscoelastic region (LVE-R) with maturity was observed indicating a significant decrease of the solid-like behavior of mango purees during maturation (Fig. 8 (a)). Indeed, the storage modulus of mango purees decreased significantly by 70% before 15 days of maturation whereas beyond this maturation stage, G' was almost steady. These results show a decrease of the solid-like behavior of mango purees during maturation which is consistent with the loss of mango firmness (D_{5N} , F_{max}) and the loss of flesh solid-like behavior (G'). This observation highlights that the loss of mango firmness has an impact on the viscoelastic properties of the mango puree.

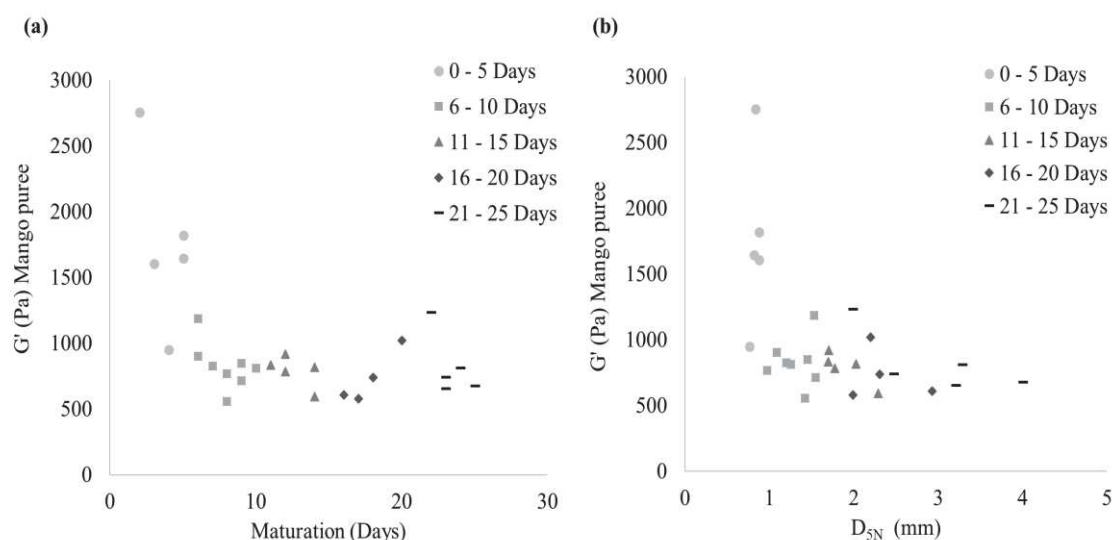


Fig. 8. Evolution of the storage modulus G' (Pa) as function of (a) the maturation (days) and (b) the D_{5N} (mm).

As for viscosity, Fig. 8 (b) shows a similar decreasing trend between for the solid-like behavior of mango puree (G') and the firmness of the whole fruit (D_{5N}), mainly when comparing early maturation stages [0-5 days] and [6-10 days] with the other stages. This observation confirmed the impact of mango firmness at early stages of maturation on the rheological properties of mango puree.

Physico-chemical analyses

Several physico-chemical characteristics of mango purees were assessed during maturation. In this study, the titratable acidity (TA, g citric acid/100g of puree) of mango purees decreased overall during maturation. Indeed, TA values were significantly higher for mangos in stages [0-5 days] and [6-10 days] than for the other stages as presented in Fig. 9. This decrease is in accordance with literature and could be explained by metabolic reactions including respiration in which organic acids are used as substrates (Gill et al., 2017; Lawson et al., 2019). After 15 days of maturation, no significant decrease of titratable acidity was observed showing that no more significant degradation of organic acids occurred after this maturation stage. Concerning TSS and DM of purees, no significant changes regarding these parameters were noticed before 20 days of maturation as presented in Fig. 9 (b). This observation is not in accordance with literature since several studies showed an increase in sugar content (hydrolysis of starch) and dry matter (loss in water) during maturation (Dea et al., 2013; Elbandy et al., 2014; Maldonado-Celis et al., 2019; Palafox-Carlos et al., 2012). This result could be explained by the fact that, in this study, TSS and DM of mango purees reached their highest values even at green stages [0-5 days], showing that these two parameters have evolved during storage of mango before

purchasing (mango have been stored at 10°C before purchasing). Indeed, for this mango variety (*Mangifera indica* cv. Kent), several works reported that the highest values of TSS are around 20° Bx (Jha et al., 2007). After 20 days of maturation, DM and TSS decreased significantly, highlighting the degradation of sugars. These observations could be explained by the fermentation phenomenon occurring at very late stages of maturation (after 20 days) during which the sugars are consumed and volatile compounds are generated. Moreover, the evaporation of volatile compounds (ethanol) during fermentation could explain the DM decrease.

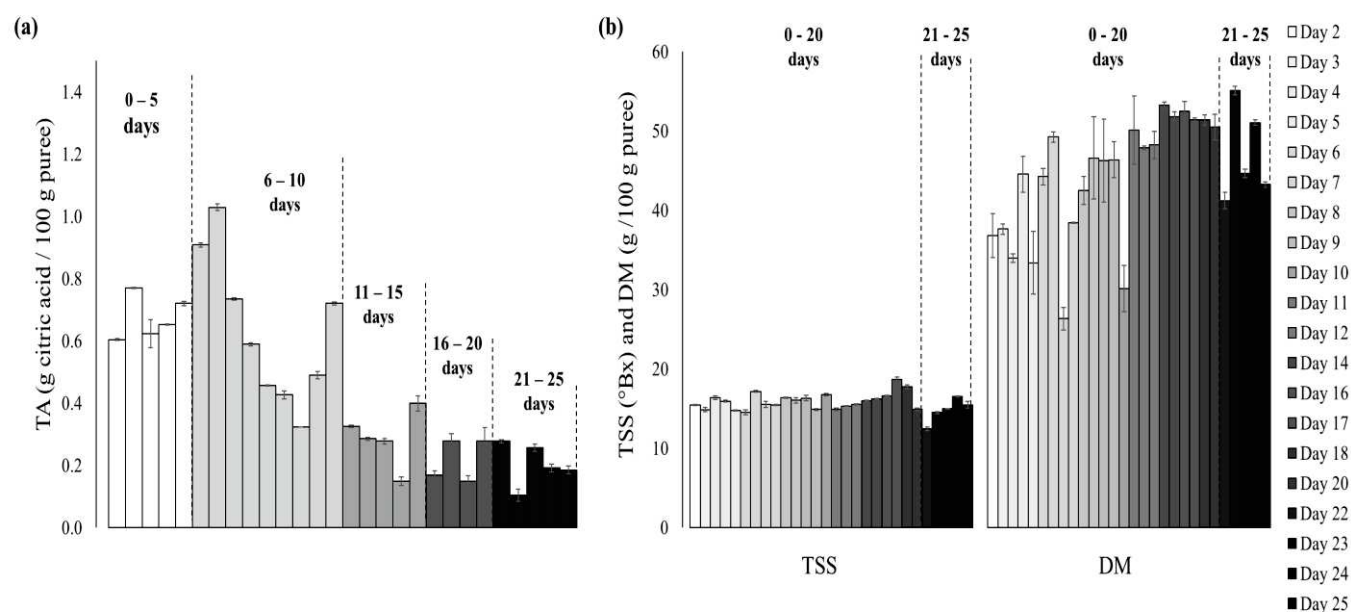


Fig. 9. Variation of (a) the titratable acidity, TA (g citric acid / 100g puree) and (b) the total soluble solids, TSS (°Bx) and dry matter, DM (g / 100g puree) during maturation.

Fresh mango heterogeneity and purees characteristics

Principal Component Analysis (PCA) was performed in order to visualize the total variability of characteristics of fresh mangos and mango purees.

As presented in Fig. 10 (a), about 80% of the variation in the data related to fresh mango was explained by the first two components PC 1 (64.43%) and PC 2 (15%). PC 1 is positively correlated with L^* , F_{max} and G' of mango flesh and negatively correlated with D_{5N} of mango. The second component (PC 2) is negatively correlated with the weight, density and b^* and positively correlated with the G' of the mango flesh.

The projection of the 28 mangos on component PC 1 of the PCA confirmed that mangos at maturation stages below 10 days (right side of the PC 1) were mainly characterized by higher values of G' , F_{max} and L^* and lower values of D_{5N} and a^* which is in accordance with the

previous results where green mangos presented high firmness and solid-like behavior as well as lighten flesh color (Fig 10 (a)). Contrariwise, the PCA highlighted that, mangos at very late maturation stage (above 20 days) were mainly characterized by the highest D_{5N} and a^* values and low F_{max} , G' and L^* values confirming their loss of firmness and solid-like behavior and their darker color. Concerning intermediate stages of maturation (between 10 and 20 days), they were concentrated on the center of the biplot. No further trends are noticeable when considering PC 2 information.

As shown in Fig. 10 (b), about 79% of the variation in the data related to mango purees was explained by the first two components PC 1 (59.31%) and PC 2 (19.59%). PC 1 is positively correlated with the particles size distribution, titratable acidity (TA) and rheological behavior of mango purees. Indeed, statistical diameters provided 54% whereas TA, G' and K contributed only to 9% each of the PC 1 information. The second component (PC 2) is positively correlated with the TSS and DM (65% of PC 2 information) and negatively with the G'' (12.6% information of PC 2).

The projection of the 28 purees onto component PC 1 of the PCA allowed to distinguish purees from mangos at very early maturation stage (below 5 days) due to their highest values of $D_{[3;2]}$, $D_{[4;3]}$, D_{10} , D_{50} , D_{90} , TA and G' . These observations are in line with the previous results showing that green stages mango purees were characterized by the highest particles size, titratable acidity and solid-like behavior of purees Fig. 10(b). As for PC 2 component, the projection of the 28 purees enabled to discriminate purees from mango at very late maturation stage (above 20 days) mainly characterized by the lowest TSS and DM. It should be noticed that neither the projection on PC 1 nor on PC 2 allowed discriminating clearly the other stages of maturation (between 5 and 20 days).

To sum up, the studied variables for fresh mangos and mango purees allowed discriminating in both cases fresh mangos and mango purees into 3 main groups according to their maturation stages: early, intermediate and late maturation stage. In this study, mangos at early stages of maturation could be distinguished by their high firmness, solid-like behavior, viscosity and particles size whereas mangos at very late maturation stage are mainly characterized by low values of total soluble solids and dry matter. Furthermore, PCA results allowed identifying relevant indicators to (i) characterize the heterogeneity of fresh mangos and mango purees and (ii) discriminate these products according to their stage of maturation. Finally, results of PCA confirmed the main trends obtained previously when considering the evolution of each variable separately as function of maturation.

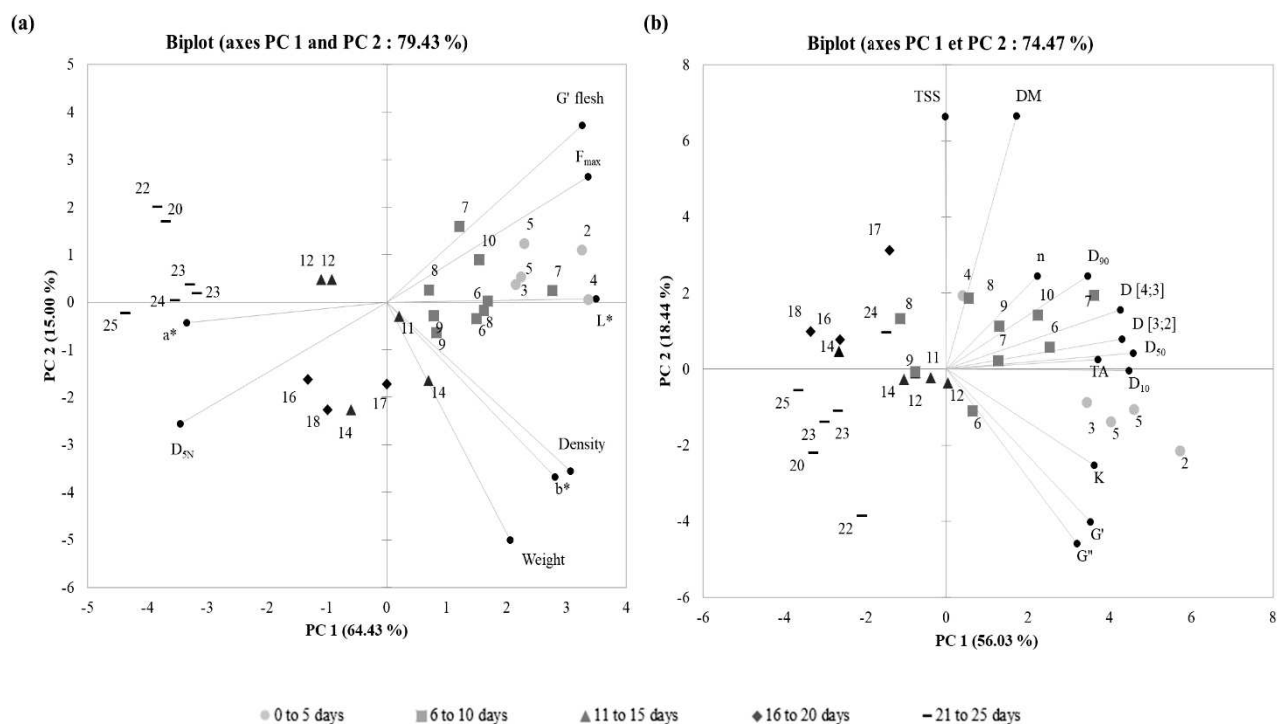


Fig. 10. **Principal component analysis (PCA)** on instrumental indicators of (a) mangos and (b) purees at different maturity stages. **a***: red to green transition, **b***: blue to yellow transition, **DM**: dry matter (g / 100 g puree), **D_{5N}**: distance of compression at 5N (mm), **D [3;2]**: Sauter mean diameter (μm), **D [4;3]**: Brouckere mean diameter (μm), **D₁₀**, **D₅₀** and **D₉₀**: particle size statistical diameters (μm), **F_{max}**: maximum value of the peak force (N), **G'**: storage modulus (Pa), **G''**: loss modulus (Pa), **K**: consistency index (Pa.s^n), **L***: lightness (black to white transition), **n**: flow behavior index, **TA**: titratable acidity (g citric acid/ 100 g puree), **TSS**: total soluble solids ($^{\circ}\text{Bx}$).

Conclusion

The aim of this study consisted in developing innovative tools for sorting mangos according to their maturity stages and to the specific properties of their purees. Instrumental characterization of fresh mangos and mango purees were carried out to identify relevant indicators of mangos heterogeneity and purees variability. Results showed that mango firmness is a great indicator of mango maturity and has an important impact on the properties of mango purees. In this work, a non-destructive compression test was proposed to measure accurately the loss of mango firmness during maturation without damaging the fruits. This fast and easy measurement allowed also to trace-back the solid-like behavior of mango measured by destructive rheological analysis. In addition, results indicated that the firmness of fresh mangos governed the particles size distributions and the rheological properties of mango purees. According to these observations, it was possible to predict the particles size of the mango purees based on the

firmness of the fresh mangos. Concerning, purees rheological properties (viscosity and solid-like behavior), compression test enabled discriminating mainly mango purees at early stages of maturation [0-10 days] from the other stages [10-25 days].

PCA results confirmed that the investigated variables in this work (textural, rheological, physical and physico-chemical) seem to be good indicators to characterize the heterogeneity of fresh mangos and mango purees. It was possible to discriminate mango and puree into 3 main groups (early maturation stages, intermediate stages and a late maturation stage) based mainly on total soluble solids, dry matter, firmness, particles size and rheological properties.

This work provided new knowledge in mango field and an innovative and simple tool to sort mango according to firmness in relation with their maturity stage. This tool could be also of great interest to anticipate the characteristics of mango puree according to mango firmness. As the proposed compression test is fast and easy to perform, this sorting strategy could be easily applied not only for mango fruits but also for many other juicy stone fruits in transformation units to reduce post-harvest losses.

1.4. Conclusion globale et validation des stratégies expérimentales proposées

La stratégie expérimentale, proposée en 1.2, nous a permis de mettre en évidence l'effet de la maturation des mangues sur le comportement viscoélastique, la taille de particules et l'énergie de cohésion entre les particules des purées de mangues. Il ressort également de ces résultats que les modifications biochimiques que subissent les mangues, principalement pendant les 10 premiers jours de maturation, ont un fort impact sur les propriétés physiques et physico-chimiques des purées. De plus, l'utilisation de la rhéologie couplée à la spectroscopie en moyen infra-rouge nous a permis de compléter ces résultats en montrant la diminution simultanée du comportement solide et de la teneur en saccharose des purées durant les 10 premiers jours de la maturation.

Dans un second temps, les résultats, présentés en 1.3, nous ont permis de montrer que la fermeté des mangues est à la fois un excellent indicateur du stade de maturation de la mangue et des propriétés physiques des purées de mangue. En effet, la fermeté des mangues, mesurée par un test de compression non-destructif, diminue significativement au cours de la maturation et elle est corrélée à la taille des particules et aux propriétés rhéologiques des purées surtout durant les 10 premiers jours. Ainsi, le test de compression non-destructif proposé s'avère être un outil rapide et simple pour trier les mangues selon leur stade de maturation et pour anticiper les propriétés rhéologiques et la distribution granulométrique des purées de mangues. Cet outil pourrait être facilement appliqué dans les unités de transformation pour réduire l'hétérogénéité des mangues avant leur transformation en purée.

Les outils de caractérisation proposés ainsi que la stratégie expérimentale ont ciblé l'étude d'un même lot de 50 mangues *Mangifera Indica* cv. Kent provenant du Pérou. Cependant, il est important de s'assurer de la robustesse de notre démarche, et ainsi de vérifier son adaptabilité à de nouveaux lots et/ou variétés de mangues.

Dans ce contexte, des analyses complémentaires ont été réalisées dans les locaux du Cirad à l'Île de la Réunion et dans les locaux du Cirad à Montpellier sur deux lots différents de mangues (premier lot en 2019 et deuxième lot en 2021) de la variété locale *Mangifera Indica* cv. Cogshall de la Réunion. Les mangues et leurs purées (conditions de broyage identiques) ont été analysées dans les mêmes conditions opératoires précédemment décrites (cf. section 1 dans la partie matériels et méthodes).

Ci-dessous sont présentés les résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

Les résultats texturaux et rhéologiques des mangues seront exprimés en fonction de la distance retenue du test de compression (D_{5N}) afin de valider la fiabilité et la généricité de l'outil proposé pour trier les mangues selon leur stade de maturation et pour anticiper les propriétés des purées. Uniquement certaines mangues ont été transformées en purées. L'extrait sec soluble (ESS, °Bx), l'acidité titrable, la viscosité, le module de stockage ainsi que la taille des particules des purées seront également présentés en fonction du D_{5N} , indicateur retenu pour caractériser la fermeté des mangues ainsi que leur stade de maturation.

1.4.1 Caractérisation des mangues fraîches

Pour les deux lots de la variété Cogshall, on remarque que l'évolution de la F_{max} (force maximale nécessaire pour pénétrer de 15 mm les tranches de mangue Cogshall) en fonction de la D_{5N} (distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression), confirme la perte de la fermeté des mangues lors de leur maturation observée sur la variété Kent (Figure 20). De plus, on remarque une chute brusque de la fermeté des mangues pendant les 6 premiers jours de maturation, surtout observée pour le lot 2. Au-delà de 6 jours de maturation, le test de pénétrométrie semble être moins sensible que le test de compression pour mesurer la perte de fermeté des mangues Cogshall. En effet, la F_{max} semble atteindre sa valeur minimale autour de 6 jours tandis que la D_{5N} continue à augmenter significativement jusqu'au jour 13 (lot 1) et 11 (lot 2) de maturation. Ces observations confirment les tendances observées pour la variété Kent.

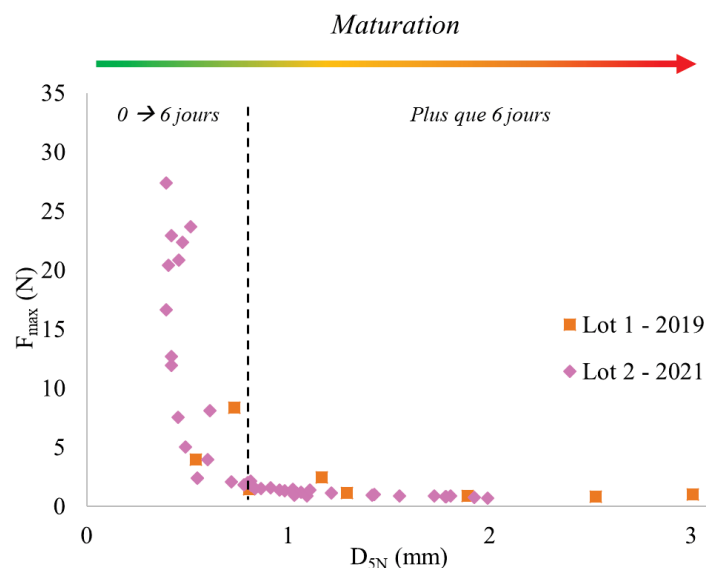


Figure 20 : Évolution de la force maximale nécessaire pour pénétrer de 15 mm les tranches de mangue (F_{max} , N) en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall des lots 1 et 2.

En ce qui concerne les propriétés rhéologiques des tranches de mangue de la variété Cogshall, la figure 21 confirme les résultats obtenus pour la variété Kent. En effet, pour les deux lots de mangues Cogshall, une diminution nette du module de stockage G' (Pa) reflétant le comportement solide des mangues est observée au cours des 6 premiers jours de la maturation. De plus, ces résultats confirment le lien entre le module de stockage des tranches de mangue (G') et la fermeté des mangues non endommagées exprimée par la distance retenue du test de compression non-destructif (D_{5N}).

Compte-tenu de ces nouveaux résultats, le test de compression non-destructif proposé dans ce travail pour mesurer la perte de fermeté/comportement solide des mangues en lien avec leur stade de maturation, semble être adapté à de nouvelles variétés de mangues.

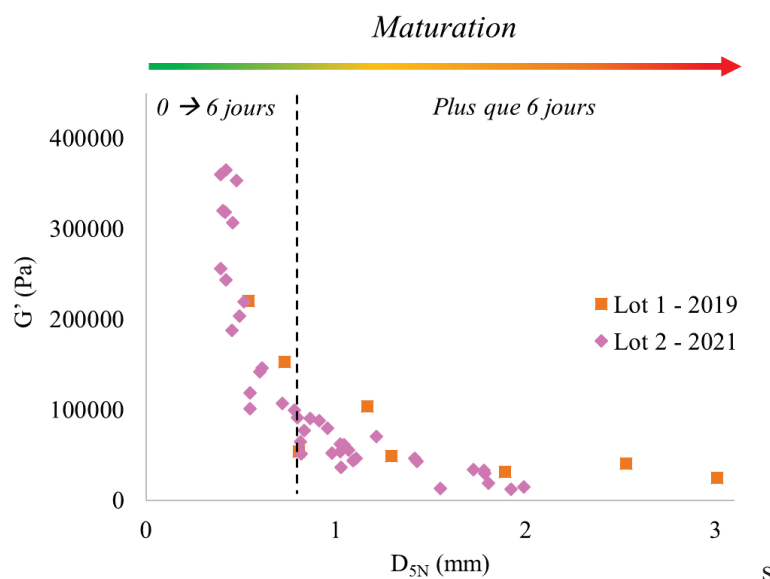


Figure 21 : Évolution du module de stockage G' (Pa) des tranches de mangue en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall des lots 1 et 2.

1.4.2 Caractérisation des purées

Comme décrit précédemment, certaines caractéristiques des purées de mangue Cogshall ont été évaluées. Il s'agit de la viscosité dynamique, de l'acidité titrable, l'extrait sec soluble (ESS) pour les lots 1 et 2 et du module de stockage G' et de la taille des particules uniquement pour le lot 2.

On remarque que l'acidité titrable (TA, g d'acide citrique/100 g de purée) ainsi que la viscosité dynamique (μ , Pa.s) des purées diminuent significativement avec l'augmentation du D_{5N} , ce qui est en accord avec les résultats observés pour la variété Kent (Figure 22 (a) et (b)). De plus, la figure 23 (a) et (b) montre une diminution nette du diamètre surfacique moyen $D_{[3;2]}$ (indicateur granulométrique) et le module de stockage (G' , Pa) avec l'augmentation du D_{5N} . Ceci confirme le lien entre la granulométrie des purées de mangues et la fermeté des mangues exprimée par la distance retenue du test de compression non-destructif (D_{5N}).

Notons que tous les diamètres statistiques ($D_{[4;3]}$, D_{10} , D_{50} et D_{90}) présentent la même tendance en fonction du D_{5N} .

En ce qui concerne l'extrait sec soluble (ESS, °Bx), contrairement aux purées de mangues Kent, une augmentation significative de l'ESS des purées Cogshall avec l'avancement de la maturation a pu être mise en évidence (Figure 22 (c)). Ce résultat s'explique par le fait que les mangues de la variété Cogshall n'ont pas subi une étape longue de transport pendant laquelle l'ESS évolue malgré les basses températures de stockage. Le fait de travailler avec des mangues

provenant directement des champs a permis de mettre en évidence cette évolution qui n'était pas visible dans le cas des mangues Kent importées par bateau.

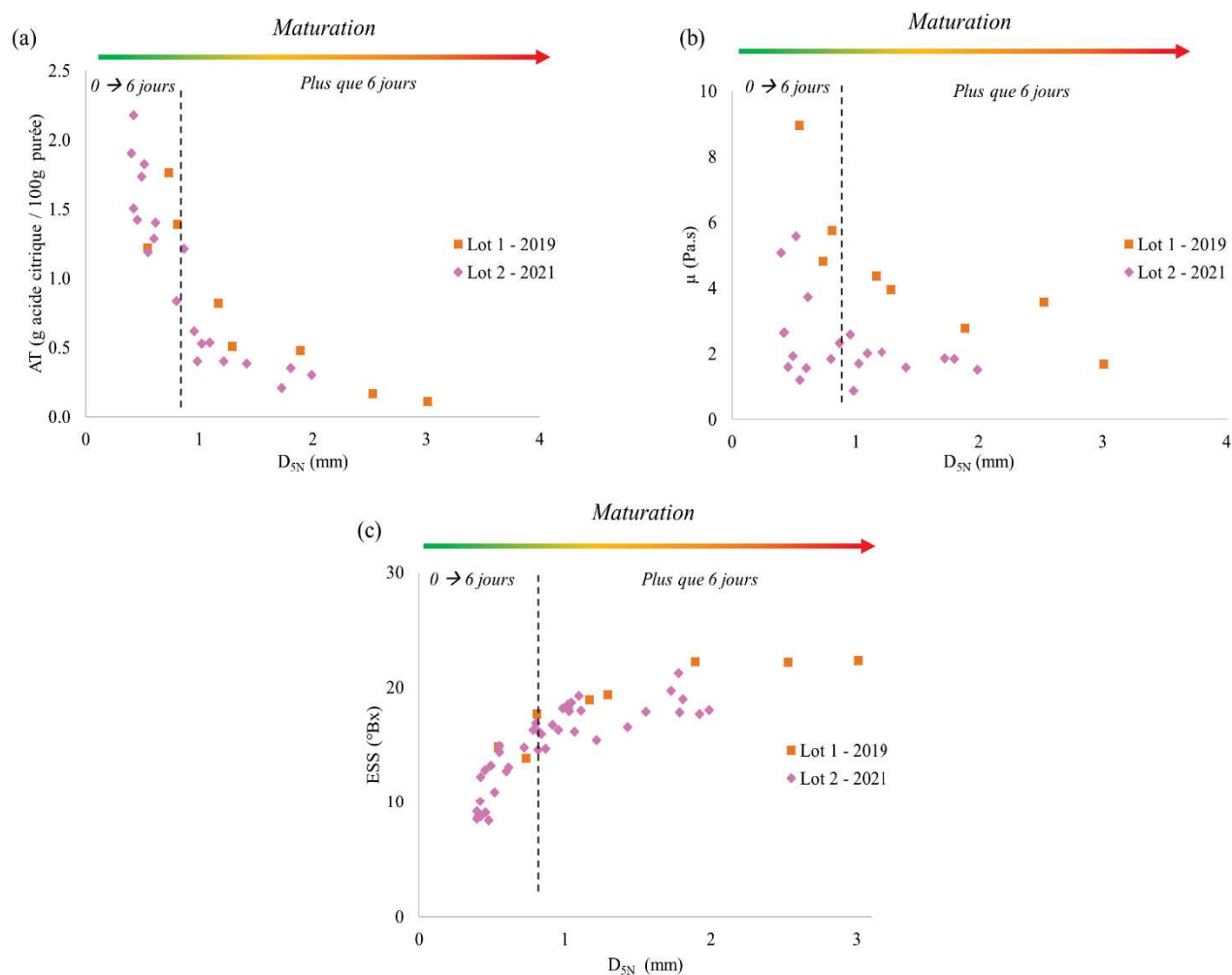


Figure 22 : Évolution de (a) l'acidité titrable, TA (g d'acide citrique / 100 g de purée), (b) la viscosité dynamique expérimentale μ à 50 s^{-1} (Pa.s) des purées (c) l'ESS ($^{\circ}\text{Bx}$) des purées des lots 1 et 2 en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall.

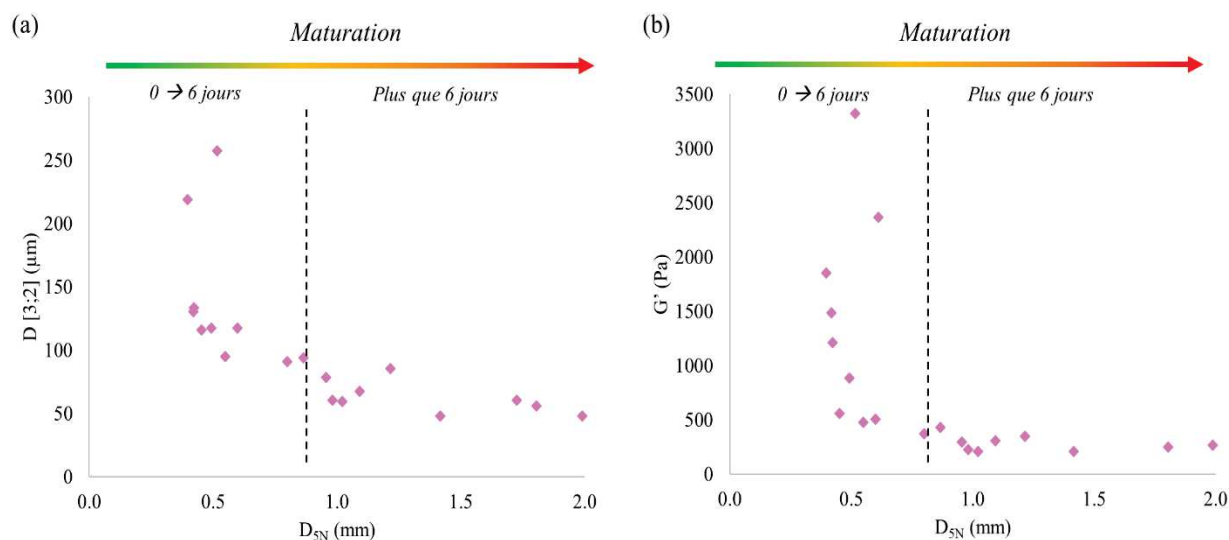


Figure 23 : Évolution de (a) du diamètre surfacique moyen $D [3;2]$, (b) du module de stockage G' (Pa) des purées de mangues lots 1 et 2 en fonction de la distance parcourue par la sonde pour atteindre une force de 5N lors du test de compression (D_{5N} , mm) des mangues Cogshall.

1.4.3 Conclusion

L'ensemble de ces résultats a ainsi confirmé la possibilité d'utiliser le test de compression non-destructif proposé dans ce travail pour (i) évaluer la perte de la fermeté des mangues en lien avec leur stade de maturation et pour (ii) anticiper les propriétés physiques (rhéologiques : écoulement et dynamique), granulométriques et physico-chimiques des purées, non seulement des mangues de la variété Kent mais aussi de la variété Cogshall.

Les premiers objectifs de ce travail ont donc été atteints. En effet, les méthodologies choisies et les stratégies expérimentales adoptées ont permis :

- D'étudier l'impact de la maturation sur les propriétés physiques et biochimiques des mangues et des purées,
- D'identifier les relations entre les propriétés des mangues fraîches et celles des purées pour choisir des indicateurs pertinents permettant de prédire les propriétés des purées,
- De prédire ces indicateurs à l'aide d'un test simple, rapide et non-destructif qui pourra être utilisé comme outil de tri des mangues fraîches dans des unités de transformation des mangues dans les pays du Sud.

2. Valorisation des mangues : *Application du procédé de texturation « Intensification de vaporisation par détente vers le vide, IVDV » pour une amélioration de la texture et de la couleur des mangues séchées.*

2.1. Préambule

La transformation des mangues sous forme de produits séchés constitue également un débouché de valorisation des mangues et de réduction des pertes post-récolte. En effet, la transformation des mangues en tranches séchées est une technique de valorisation et de conservation efficace, développée en Afrique de l'Ouest depuis le début des années 1980.

Cependant, comme pour les purées, la qualité des mangues séchées (goût, couleur, texture et arômes) dépend du stade de mûrissement des fruits utilisés. En effet, au cours du séchage des mangues par air chaud, certains défauts de qualité (couleur foncée, texture caoutchouteuse, rétrécissement de la forme) sont observés si les fruits proviennent de stades de maturation avancés.

Actuellement, on retrouve plusieurs technologies innovantes de séchage, comme le séchage par rayonnements lumineux (infra-rouge) ou électromagnétique (micro-ondes), par champs électriques pulsés et par la technologie du CO₂ supercritique, qui peuvent remplacer le séchage à air chaud et réduire ses effets indésirables sur les qualités organoleptiques. Néanmoins, la plupart de ces techniques restent très coûteuses et peu accessibles (Zeaiter, 2019).

Ainsi, certains procédés de texturation (intervenant au cours d'une opération de séchage convectif par air chaud) tels que la détente instantanée contrôlée (DIC) et l'intensification de vaporisation par détente vers le vide (IVDV), ont été proposés pour améliorer les phénomènes de transfert lors d'une opération de séchage et améliorer la qualité du produit séché. La texturation, consiste en une augmentation du volume des produits en l'exposant à une pression de vapeur élevée, suivie d'une décompression vers le vide. L'expansion des produits, facilite ainsi l'évaporation de l'eau lors du séchage, réduisant donc sa durée et, par conséquent, diminuant l'apparition de défauts organoleptiques.

Plusieurs travaux ont montré que l'utilisation de ces procédés de texturation permet l'obtention de produits dotés de meilleures propriétés physiques et physico-chimiques (texture, forme et

couleur) tout en conservant les qualités nutritionnelles et assurant une décontamination microbienne (Li et al., 2019, 2021; Louka et al., 2004; Mrad et al., 2015, 2014b; Nader et al., 2016b).

Compte tenu de ce qui précède, dans cette troisième partie du travail nous nous sommes intéressés à introduire, pour la première fois dans la filière mangue, le procédé thermomécanique de texturation intitulé « Intensification de vaporisation par détente vers le vide, IVDV » au séchage par air chaud classique, dans le but d'obtenir des mangues séchées expansées dotées d'une texture et une couleur appréciées. L'objectif principal de cette partie est de proposer une voie de valorisation pour les mangues provenant d'un stade avancé de maturation afin de réduire les pertes post- récolte.

Pour cela, sur un lot de 40 mangues (2 différents stades de maturation) de la variété Kent *Mangifera Indica* cv. Kent provenant du Brésil, un séchage par air chaud accompagné d'un traitement par IVDV a été réalisés. Une caractérisation physique des mangues expansées : taux d'expansion, fermeté et couleur a été effectuée. Les différentes réponses physiques et physico-chimiques nous ont permis d'identifier les conditions opératoires optimales (teneur en eau initiale, pression de vapeur et temps de traitement) du procédé IVDV en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) afin d'obtenir des mangues séchées expansées de texture, forme et couleur optimales.

La mise en place du procédé de texturation a été réalisée sur un lot de 20 mangues dont le mûrissement variait entre 0 et 10 jours (lot 1) et est présentée dans la section 2.2. sous forme d'un projet de publication.

La validation de l'applicabilité de ce procédé sur des mangues mûres, pour proposer une voie de valorisation des mangues à stade de maturation élevé, est présentée dans la section 2.3.

2.2. Vers une valorisation des mangues par un nouveau procédé de texturation : *Utilisation de l'Intensification de Vaporisation par Détente vers le Vide, IVDV*

Les résultats concernant cette partie du travail sont présentés ci-après sous la forme d'une publication non finalisée à ce jour, et intitulée « **Physicochemical properties improving of dried mango cubes, using of a novel technology “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV) combine with conventional hot-air drying** ». Le travail présenté ici sera complété par des données sur les propriétés nutritives (composés

phénoliques, activités antioxydantes et concentrations en vitamines) des produits séchés, données qui viendront ainsi finaliser la publication.

Ce travail a été réalisé sur le lot 1 constitué de 20 mangues de stade de maturation compris entre 0 et 10 jours.

2.2.1 Physicochemical properties improving of dried mango cubes, using of a novel technology “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV) combine with conventional hot-air drying

Projet de publication dans le journal « Food Chemistry »

Paola Labaky ^{a, b, c}, Hiba N. Rajha ^{a, d, *}, Layal Dahdouh ^b, Julien Ricci ^b, Charlotte Delpech ^b, André El Khoury ^a, Lidwine Grosmaire ^c, Christelle Wisniewski ^c, Nicolas Louka ^{a, d}

- a. Université Saint Joseph de Beyrouth, Faculté des Sciences, Centre d'Analyses et de Recherche, Unité de Recherche Technologies et Valorisation Agro-alimentaire, Beyrouth, Liban.
- b. CIRAD, UMR Qualisud, F-34398 Montpellier, France.
- c. Qualisud, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier SupAgro, Univ d'Avignon, Univ de La Réunion, Montpellier, France.
- d. École Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth (ESIB), Université Saint Joseph de Beyrouth, Beyrouth, Liban.

Abstract

Mango has an abundant production leading to important post-harvest losses. Drying mangos constitutes an alternative to reduce these losses. However, applying conventional hot-air drying leads, in most cases, to a decrease in physicochemical, organoleptic, and nutritional qualities of the fruits. The aim of this study consisted in investigating the use of the IVDV as a treatment applied during conventional hot-air drying allowing, to reduce the undesirable effects of the conventional drying and to improve the quality of the dried mangos (regain their original volume and shape and obtaining better structural, textural and organoleptic qualities). To this end, the effect of three treatment parameters (saturated steam pressure (P), initial water content (W) and processing time(t)) on the volume, texture and color (Expansion ratio, hardness, Work done, number of peaks and color) has been studied using response surface methodology (RSM).

Results showed that the IVDV effectively increased the expansion ratio of mango cubes, decreased their hardness (crunchy texture) comparing those dried with conventional hot-air drying and significantly improved the color of the mango cubes. Thus, this new thermomechanical IVDV process significantly improved the appearance of the mango cubes by increasing their volume, providing a crunchy texture and improving their colors in order to propose new crispy and healthy mango snacks.

Keywords

Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum (IVDV), Texture, Color, Expansion, Hot-air drying, Response Surface Methodology, Phytochemical.

Introduction

Mango (*Mangifera indica* L.) is one of the most important tropical fruits in the world, ranked second in global production after banana (FAO, 2020; Okino-Delgado et al., 2020). There are approximately a thousand of mango varieties cultivated around the world. They vary in size, shape, texture, color and nutritional properties. Mangos are appreciated for their delicate taste, pleasant aroma and high nutritional value due to its richness in vitamins, minerals and phenolic compounds (Maldonado-Celis et al., 2019; Matheyambath et al., 2015).

However, mango's abundant seasonal production leads to enormous post-harvest losses estimated to up to 40% in some Western African countries (Arnoldus et al., 2011; Boateng, 2016; Memon et al., 2013; Okino-Delgado et al., 2020). In addition, being a climacteric fruit, mangos are characterised by a heterogeneity linked to their ripening stages. Nowadays, transforming mangos into products with controlled quality, constitutes an alternative to valorize this tropical fruit, to reduce post-harvest losses and to offer mango products outside seasonal time (Arnoldus et al., 2011; Evans et al., 2017).

Two recent studies conducted by Labaky et al., (2021, 2020) were interested in controlling the heterogeneity linked to ripening stages of mango fruits by developing a sorting technique that allow reducing post-harvest losses while controlling their rheological, granulometric and physico-chemical properties. The authors understood the impact of ripening on the physical and biochemical properties of mango purees and proposed a non-destructive tool allowing an accurate prediction of mangos ripening day and physico-chemical properties of the upcoming purees. These studies presented a great interest for reducing mango post-harvest losses and proposing mango purees with controlled qualities. However, due to the very abundant production, transforming mangos into purees is not sufficient. It arises of than a real concern for finding other alternatives to valorize excessive mangos.

Even though, hot-air drying can be considered an effective method to extend the shelf-life and valorize mangos into new products. Conducting conventional hot-air drying leads, in most cases, to a decrease in physicochemical, organoleptic, and nutritional qualities of the fruits. In fact, during a conventional hot-air drying, a rubbery texture and a severe shrinking and a deformation of the product's shape can be observed (Yi et al., 2017). The obtained rubbery texture and the sever shrinking is due to the high temperatures and long processing times inducing a thermal degradation. Indeed, during the hot-air drying a large amount of water is lost, giving the product a compact structure trapping the water. Thus, in order to evaporate the remained water, trapped in the structure of the product, a prolonged exposure at high

temperature is require. As a consequence, this thermal degradation inducing modifications in the textural (notably rubbery), physico-chemical (color, aromas) and nutritional (vitamins, minerals, polyphenols, etc.) properties of the products, lead to a decrease in the product quality and limits the demand for dried products (Link et al., 2017).

Thus, in order to improve the quality of the dried mangos, a texturing step is suggested during the conventional hot-air drying to reduce its undesirable effects and improve the quality of the product (crunchiness, color and shape). Several methods, based on a sudden temperature increase such as “popping” or on a quick decompression such as “puffing”, the “cooking-extrusion”, the “Instant control pressure drop” (DIC) and the “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV), were suggested (Maroun et al., 2018). All of these are based on self-vaporization of the moisture contained in the food product while ensuring a sudden pressure release.

The DIC and IVDV consist in a high pressure/high temperature treatment followed by a very fast release to vacuum before reaching atmospheric pressure (Maroun et al., 2018). Both were designed to texturize products in order to try to recover their initial shape and size by improving their textural, physicochemical and sensory properties (Mrad et al., 2014c). These techniques reduce the hot air-drying time since the post-texturing drying becomes faster due to the expanded structure that allows an increase in the diffusivity and initial accessibility of water, inducing thus an easier evaporation of the water trapped in the product structure.

Although, the “Instant control pressure drop”, DIC appeared to significantly inhibit the deformation and increase crispness of mango and papaya fruit chips (Yi et al., 2016, 2017), potatoes, carrots, onions, broccoli and tomatoes (Louka et al., 2004; Louka and Allaf, 2004) and apple (Iguedjtal et al., 2007; Li et al., 2019, 2021), the treatment requires a significant long time to reach the pressure of treatment. This can be considered a major disadvantage particularly in the case of thermosensitive product considering that the time necessary to rise in pressure can exceed that of the “treatment "high pressure / high temperature”. This considerable prolongation that the product undergoes during the rise in pressure can induce considerable thermal degradations.

The novel thermo-mechanical process (IVDV) has been developed in order to remedy this inconvenient. Indeed, a very fast pressurization system has been invented allowing to reach high pressure (up to 12 bars) in less than a second. This improvement makes it possible to subject products to a HTST (high temperature /short time) treatment, which until now is known and reserved only for an application on liquid products. This mastery of high-pressure/high-temperature niche processing allows us to expand thermally sensitive products before triggering

degradation reactions that often require activation energy (Abi-Khattar et al., 2020). Moreover, the IVDV aims to improve the physical properties of products (texture, shape, and color) while conserving the nutritional qualities (Mrad et al., 2015, 2014c) and providing microbial decontamination (Mrad et al., 2014a, 2014b; Nader and Louka, 2018).

To this end, the aim of this study was to investigate the use of IVDV as a treatment applied during conventional hot-air drying allowing the dried mangos to regain their original shape and volume and obtaining better structural, textural and organoleptic qualities. This will go through studying the effect of the treatment parameters (saturated steam pressure (P), initial water content (W) and processing time (t)) on the shape, texture and color (Expansion ratio, hardness, Work done, number of peaks and color) and nutritional content (phenolic compounds, vitamins, etc.) using response surface methodology. The ultimate goal is to propose a valorization path for excessive mangos in the form of crispy healthy snacks allowing to reduce post-harvest losses caused by the abundant production.

Materials and methods

Fruits

Green mangos (*Mangifera indica* L., cv. Kent, Brazil) were purchased from a local market (Grand Frais, Montpellier, France) and were used for the experiments. A non-destructive compression measurement was carried out on mangos to identify their ripening days, based on the method developed by Labaky et al., (2020). All mangos presented almost the same firmness (compression distance) which, represents days of ripening between 0 and 10. After washing and peeling, mangos were cut into cubes of 1 cm³ using a grid dicing device and then dipped, less than 30 seconds, in water.

Drying method

Mangos cubes were arranged in a single layer and dried in a hot-air drier at 60°C for a certain period time, at an air velocity of 2.8 m/s with relative humidity of 14 %. The mango cubes were dried until the appropriate and desired water contents for the experimental design were reached (9.9, 15, 22.5, 30 and 35.1 %). The partially hydrated mangos cubes were stored for three days at 4°C, to ensure a better homogenization and uniform distribution of residual water throughout the cubes.

IVDV reactor

The IVDV processing reactor as its illustrative diagram shows Fig 1 (II), consisted in: (A) a processing chamber, (B) a vacuum tank, (C) a vacuum pump, (D) a steam generator, and (E) an ultra-speed pressure-increase system.

In the processing chamber (A), which presents an internal volume of 12 L, the samples were treated under high pressure and high temperature for a certain period of time followed by a sudden release pressure (towards a vacuum reaching 0.001 MPa) resulting in the vaporization of a part of the water inside the treated product. Instantaneous cooling is provided at the same time to prevent thermal degradation of the product. The resulting rate of expansion, porous structure, hardness and color of the treated mango cubes differs depending on the three operating conditions: the steam pressure (P), the initial water content (W) and the processing time (T). The originality of the IVDV process lies in the rapid steam pressure increase (less than 1 s) provided by the connected ultra-speed pressure-increase system (E).

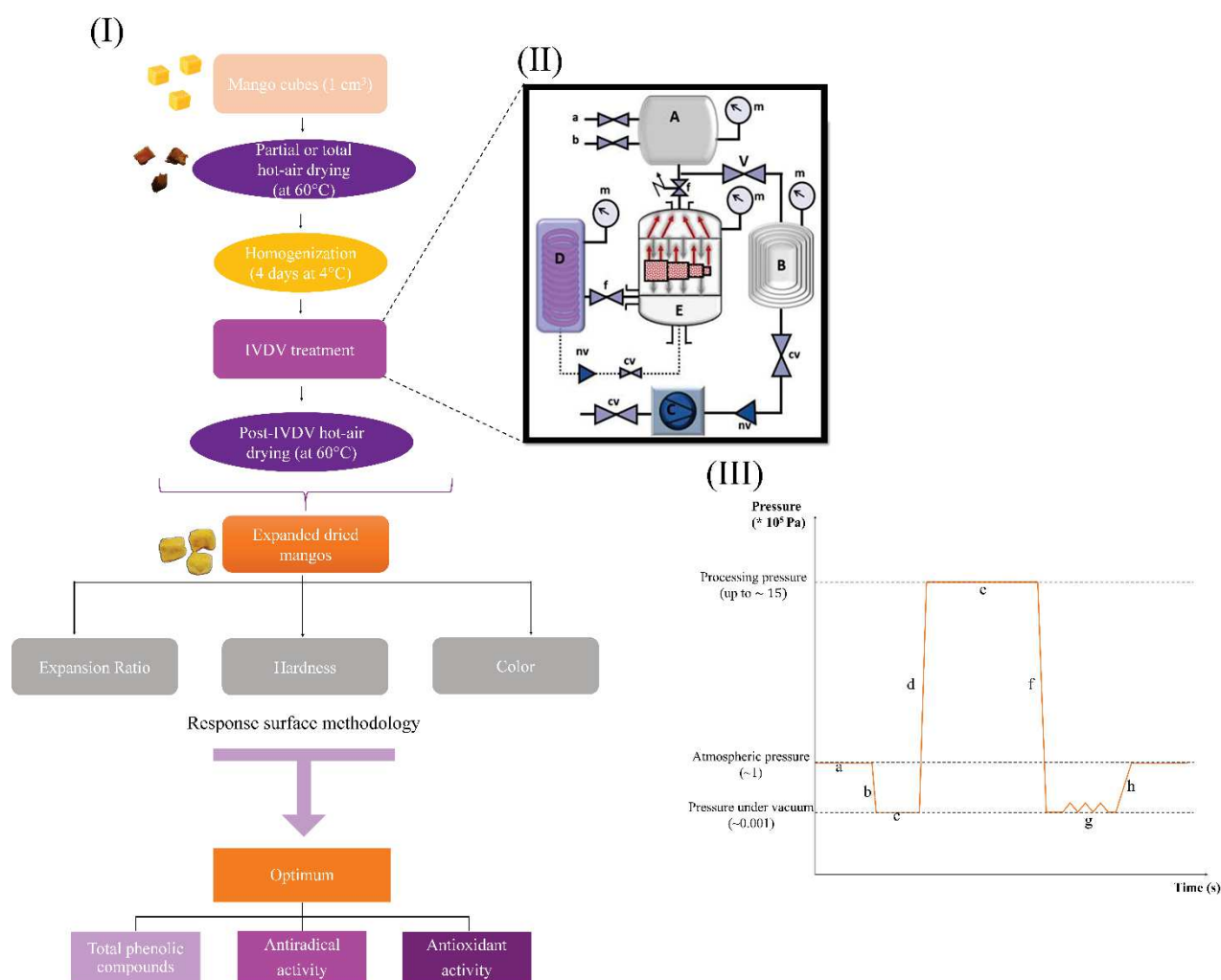


Figure 1: (I) Flow chart of the experimental protocol. (II) Schematic diagram of the IVDV system: A: processing chamber; B vacuum tank; C: vacuum pump; D: Steam generator; E: ultra-speed pressure-increase system; a: ambient air injection valve; b: outlet valve; m: manometer; f: steam inlet valve; V: rapid decompression valve; cv: connection valve; nv: non return valve). (III) The pressure-time profile of the IVDV processing cycle; a: sample in the processing chamber at atmospheric pressure; b: decompression to vacuum in the processing chamber (~ 0.01 s); c: vacuum dwell for a few seconds; d: ultra-fast vapor pressure rises (with a $\Delta P/\Delta t$ greater than $12 \cdot 10^5$ Pa/s) to reach the processing pressure P; e: processing time under high pressure and high temperature; f: release pressure to the vacuum (< 0.02 s); g: stay under vacuum for 2 to 3 s followed by an air shower for a few seconds; h: return to atmospheric pressure in the processing chamber and recovery of the product.

The expansion process

After carrying out a rehydration and homogenization, mango cubes were texturized using the IVDV reactor. This thermo-mechanical texturizing treatment consists in four main steps illustrated in figure 1 (III).

The first step consists in establishing an initial vacuum. The hydrated mango cubes were placed in the processing chamber and were subject to a decompression to vacuum (pressure drop from atmospheric pressure to a vacuum of 0.001 MPa) for 2-3 seconds. This decompression to vacuum, facilitates steam diffusion and accelerates product heating (Nader and Louka, 2018). This step is followed by the steam injection. During this second step, a rapid pressure increase (in less than one second with a rate $\Delta P/\Delta t$ higher than 12 bar/s) is activated by the steam generation system. The products then undergo a high steam pressure "P" treatment (up to 15 bar) for a short time up to 35 s. This time is necessary to acquire the rheological characteristics and thermal equilibrium of the product allowing its expansion. Afterwards, the third step involves a sudden decompression to vacuum. This step corresponds to a rapid expansion towards vacuum in less than 1/50th of a second inducing a phenomenon of partial self-vaporization of water, a rapid cooling of the product and a controlled expansion of the treated product. Finally, the fourth step consisting in returning to the atmospheric pressure. This last step consists of cold air injection (atmospheric or pressurized while maintaining the vacuum) in order to ensure an even more intense cooling and to avoid thermal degradation, followed by a return to atmospheric pressure. Following the IVDV treatment, the obtained expanded mango cubes have been subjected to a final drying treatment at 60 °C for until reaching a water content of 5.5% db.

Expansion Ratio

The expansion ratio (ER) was assessed to evaluate the volume increase of mango cubes after expansion process. Measurements were carried out according the method described by (Louka and Allaf, 2004). The method consisted in measuring the bulk density of the control dried mango cubes (ρ_d ; hot-air drying) and the expanded ones (ρ_e ; combination of the hot-air drying and the IVDV process). The expansion ratio (ER) was obtained on the basis of Eq. 1:

$$ER = \frac{\rho_d}{\rho_e} \quad \text{Eq. 1}$$

With ρ_d the bulk density of mango cubes dried only by hot air and ρ_e the bulk density of mango cubes treated by IVDV.

Textural analysis

Measurements of the textural attributes of the expanded mango cubes was conducted using a texture analyzer (TA-XT2, Stable micro Systems, London, UK) equipped with a 5 kg load cell. The choice of the most adequate probe for the textural measurements was the subject of an exploratory study. Trials and error testing were carried out to define and validate an appropriate method of testing since any variation in the sample, the probe and the testing parameters may lead to changes in the measurement results. Two probes: a craft knife blade (6 cm wide and 0.6 mm thick) and a spherical probe (2 cm diameter), were tested on different samples from different points of the experimental design. Analyses of variance (ANOVA) were applied and the results showed that the knife blade was the most discriminating and repeatable. Thus, compression tests were performed on the dried and expanded mango cubes using a craft knife blade (6 cm width and 0.6 mm thickness) at a cutting speed of 0.5 mm/s to determine the textural parameters. The measurements were carried out to reach a maximum compression force required to shear the sample and the applied force on the cubes versus the distance traveled by the probe was recorded using Exponent software (version 5.1.1.0). The resulting texture profiles allowed calculations of the hardness (HARD), the QF, and the WD. The hardness (in N) was defined as the maximum peak force required to break the sample (Meng et al., 2010) while the QF, identified by the number of peaks appearing in the force-strain curve, designates the crispy characteristic of the sample (Lazou and Krokida, 2010). On the other hand, the WD (in mJ) is the energy required to overcome the internal structural bonds within the mango cubes (Nader et al., 2016a).

Color

The color of the dried and expanded mango cubes was measured using a Minolta CR-300 colorimeter (Konica Minolta Sensing, Inc, USA). The instrument was set to measure according to the CIE color system (International Commission on Illumination, abbreviated CIE for its French name). Values of the luminance (L^*), redness (a^*) and yellowness (b^*) were measured. Six replications were conducted on 8 mango cubes of each run of the Central Composite design and the total color change (ΔE), indicating the difference of colors comparing to the hot-air dried mangos and the ones treated with the IVDV, was calculated according the equation 2: (Gowen et al., 2006; Kaur et al., 2005; Mrad et al., 2014c).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad \text{Eq. 2}$$

L_0^* , a_0^* and b_0^* being the measurements of hot-air dried mangos.

Experimental design

Response surface methodology (RSM), was adopted to investigate the effect of expansion by IVDV and to optimize this texturizing process on mango cubes. The three most influencing operating parameters were the steam pressure (P), the initial water content (W) and the processing time (t). P was ranged between 0.2 and 0.7 MPa, while W varied from 9.9 and 35.1 % db and t from 9.9 and 35.1 s.

Table 1 shows the established central composite rotatable design composed of a 2^3 factorial design with 6 repetitions at the center points and 6 axial points (stars). The range and the center points of the experimental parameters were chosen based on preliminary trials. The operating parameters were tested on 20 experiments to evaluate their effects on the expansion ration (ER), the hardness of the cube (HARD), the Work done (WD) and the color parameters the Luminance (L^*) and the total color change (ΔE) and to identify their optimum levels. The experiments were conducted randomly to minimize the effects of unexpected variability in observed responses.

Experimental design and data processing of the obtained results were performed using Statgraphics *Plus* (19.2.01 version, Windows). A second-degree polynomial equation (Eq. (3)) was fitted in each response to describe the process empirically:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 \quad \text{with } j > i \quad \text{Eq. 3}$$

where Y is the predicted response; X_i, X_j are the coded levels of the independent variables; a_0, a_i, a_{ii} and a_{ij} are the constant, linear, quadratic and interaction regression coefficients, respectively.

Statistical analyses

All measurements were conducted in triplicate to ensure the repeatability of the results while reproducibility was covered by the six repetitions at the central level as suggested by the experimental design. Data reported are presented as the average $\pm$ standard deviation. All data were subjected to statistical analysis using the analysis of variance (ANOVA), and Least Significant Difference (LSD) tests as done by STATGRAPHICS® Centurion XV (Statgraphics 19, The Plains, Virginia).

Results and discussion

The Pareto charts, the estimated response surfaces and the corresponding estimated response contours for the expansion ratio (ER) and the hardness (HARD) and only the Pareto charts for the work done (WD) and color parameters (L^* and ΔE) are presented in figure 2 and 3. Pareto charts show the significance of the operating parameters, their linear and their quadratic effects, with either their positive or negative impact, on the different response parameters. The estimated response surfaces illustrate the general aspect of response parameters in function of two independent variables when keeping the third fixed. They also show the significant interactions between the operating parameters. The corresponding estimated response contours will allow us choosing different treatments that are able to provide the same results for response parameters and later on the combinations of levels of factors, when optimizing many responses, necessary to achieve the optimal predicted value.

Table 1: Response parameters values of the expanded mango cubes differently treated by IVDV based on the Central Composite design.

Run	Central composite Design	Variable Levels Uncoded			Response parameters			
		P (MPa)	W (%)	t (s)				
					ER ^a	HARD ^a	WD ^a	ΔE ^a
Dried Mangos		-	-	-	1	19.43	1003.47	0.00
1	Factorial points	0.3	15	15	2.2	10.05	88.36	19.07
2		0.6	15	15	3.25	8.11	66.62	19.75
3		0.3	30	15	2.46	9.64	71.13	18.21
4		0.6	30	15	2.51	8.39	55.65	18.53
5		0.3	15	30	2.38	8.03	75.20	17.66
6		0.6	15	30	3.62	4.97	52.69	10.77
7		0.3	30	30	3.03	8.97	78.72	18.71
8		0.6	30	30	3.33	8.53	60.62	15.72
9	Axial points	0.2	22.5	22.5	2.39	13.58	122.83	18.65
10		0.7	22.5	22.5	3.36	7.07	71.81	14.11
11		0.45	9.9	22.5	3.36	8.73	74.24	16.93
12		0.45	35.1	22.5	2.97	8.3	68.14	17.47
13		0.45	22.5	9.9	2.85	9.97	92.52	21.99
14		0.45	22.5	35.1	3.38	6.81	58.72	16.30
15	Central points	0.45	22.5	22.5	3.82	8.49	79.28	17.21
16		0.45	22.5	22.5	3.67	7.56	66.85	17.83
17		0.45	22.5	22.5	3.38	7.87	65.78	16.17
18		0.45	22.5	22.5	3.4	7.17	64.68	17.83
19		0.45	22.5	22.5	3.71	6.94	81.25	19.34
20		0.45	22.5	22.5	3.64	7.51	78.32	18.26

Effects of independent variables on the response parameters

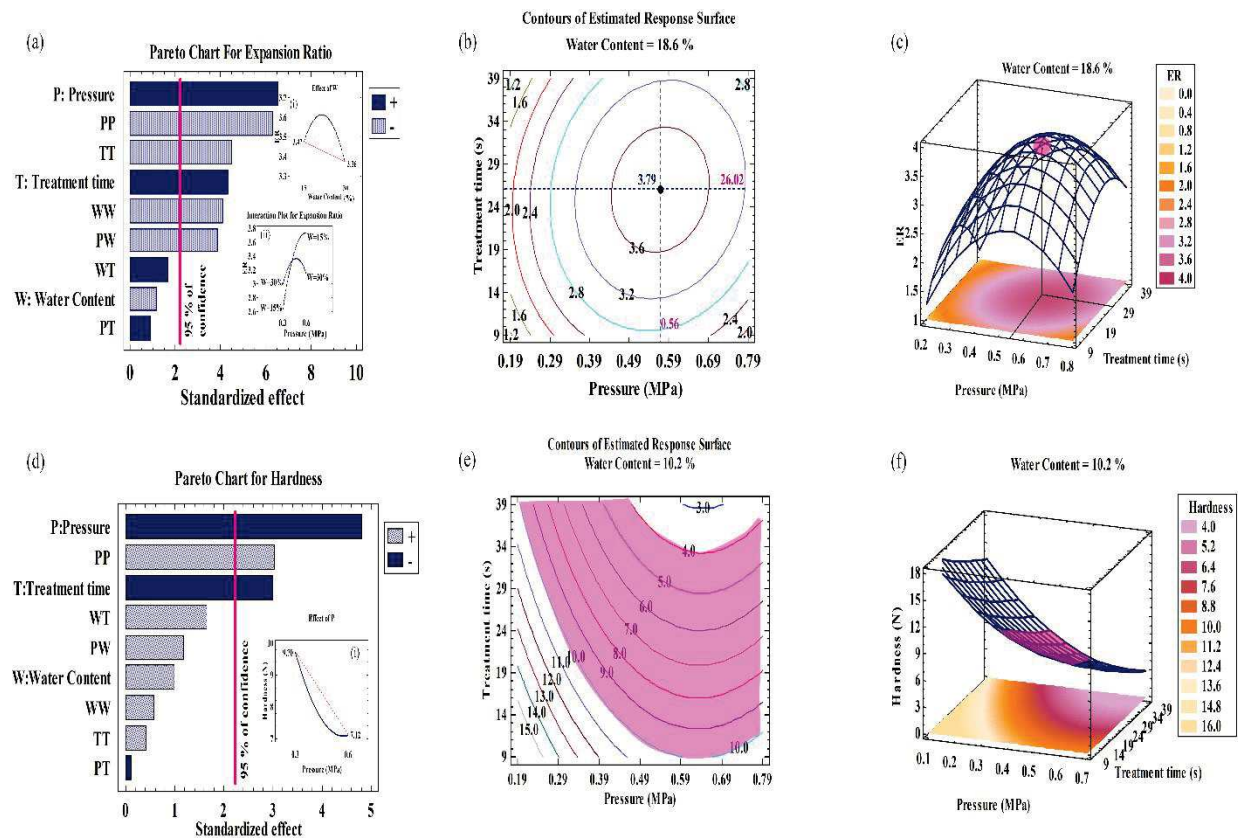


Figure 2: (a) Standardized Pareto chart of the expansion ratio with (i) the effect of the water content on the ER and (ii) the interaction water content / pressure; (b) the contours of estimated response surface of the expansion ratio; (c) Response surface plot of operating variables on the expansion ratio; (d) Standardized Pareto chart of the hardness with (i) the effect of the pressure on the hardness ; (e) the contours of estimated response surface of the hardness; (f) Response surface plot of operating variables on the expansion ratio of IVDV expanded mango cubes.

Expansion Ratio

The expansion ratio of the IVDV treated mango cubes represents their volume increase in comparison to the conventionally dried mango cubes for the same weight. Expansion ratio values of all mango cubes were higher than 1 with a variation from 2.20 to 3.82, indicating a significant increase in the volume of all mango cubes due to the IVDV treatment (volume increasing up to 3.82 times compare to the dried cubes).

According to the Pareto chart presented in figure 2 (a) the linear effect of the pressure, the time, the quadratic effect of the pressure, the time and the water content and the interaction pressure/water content appeared to have a significant influence (p -value < 0.05%) on the expansion ratio of mango cubes.

The Pareto chart revealed that the expansion ratio seemed to be highly and mostly affected by the positive linear effect of the pressure (figure 3 (a)). This observation indicating that a high pressure induces a higher expansion ratio can be explained as the following: since the temperature of the saturated steam depends only on the pressure, the level of decompression ΔP will determine the extent of the sudden drop in temperature ΔT after the pressure drop (Louka, 1996). This temperature drop, will release a certain quantity of energy which will be used primarily to evaporate a certain quantity of water present in the product by self-evaporation. The generated steam induces an intense mechanical constraints due to self-vaporization provoking the expansion of the mango cubes and giving an alveolated structure (Louka and Allaf, 2002; Nader and Louka, 2018). Therefore, the higher the steam pressure, the more steam vapor is generated by self-vaporization and higher is the expansion ratio (Mrad et al., 2014b) explaining the positive effect of the pressure. Nevertheless, the negative quadratic effects of the pressure on the expansion ratio of mango cubes showed that a high steam pressure induces a decrease in the expansion ratio. Indeed, as explained before the high pressure/high temperature treatment leads to a higher expansion. However, the high temperature gives the product an important elasticity which makes that, following the instant temperature drop, the product tends to shrivel before being rigidified. All these phenomena lead to a final product with a less expanded structure. Thus, a steam pressure above 0.3 MPa is necessary to insure a sufficient pressure/ temperature drop to provoke mango cubes expansion without a shrinking. Although the steam pressure seems to be the major operating parameter affecting the expansion ratio, the treatment time affecting the rheological properties of mango cubes, seems to positively affect also the expansion of their structure (figure 3(a)) (Louka et al., 2004; Louka and Allaf, 2002; Mrad et al., 2015; Nader and Louka, 2018). In fact, a specific heating time is required not only to reach the thermal equilibrium but mainly to ensure that the product can acquire the adequate rheological characteristics to be expandable (Louka and Allaf, 2002). The longer the product is heated, the more the product presents viscoelastic behaviors and the more it expands (Louka et al., 2004; Louka and Allaf, 2002). This explains the positive effect of the treatment time on the expansion ratio. However, the negative quadratic effect of the treatment time on the expansion ratio shows that a treatment time above 15 s is required to ensure the viscoelastic properties of the mango samples allowing their expansion. Beyond 25 s the expansion ratio seems to be stabilized. Moreover, based on the Pareto Chart in figure 2 (a) the water content didn't appear to have significant linear effect on the expansion ratio in the range of variability (15 and 30%) chosen in this study. This means that we obtained the same

expansion rate with 15 and 30% water content. However, the water content of the product plays an important role on the expansion ratio since a negative quadratic effect can be observed. This indicates that higher expansion ratios are obtained for intermediate water content values, between 15 and 30 % (figure 2ai). Indeed, the higher initial water content, the greater the amount of water available to be evaporated. Yet, as for the increase of the pressure/temperature, the increase in water content induces two effects: on the one hand, it will induce a higher expansion and on the other hand, it will give the product a higher elasticity, so that after the expansion, the product that is more expanded and more elastic. When the steam present in the product, escapes or condenses inside the cubes, the mechanical constraints caused by this steam will decrease and if the product continues to have an elastic behavior, its volume tends to decrease. Therefore, a product with an initial water content of 30% will expand much more than a product with 15% of water content. However, because of the elastic behavior due to higher water content, the product will deflate and keep a much smaller final volume. This volume is determined by the temperature of hardening of the product, at which the product loses a lot of its elasticity and therefore is able to support its own weight. Similar results were observed by Louka et al., 2004, 2002 when the DIC process was applied on potatoes, carrots and onions and by (Mrad et al., 2014c; Nader et al., 2017; Nader and Louka, 2018) during an application of IVDV process on purple maize and defatted peanuts , respectively.

Finally, concerning the interaction between the water content and the pressure, in the figure 2 (a ii), it presents the evolution of the expansion ratio when the pressure varies from 0.3 to 0.6 MPa at both level of the water content 15 % and 30 %. It can be noticed that a completely different tendency is observed when the water content is at 15 % and at 30 %, explaining the significant effect of this interaction.

This interaction means that the evolution of the expansion ratio as a function of the pressure depends largely on the water content present in the mango cubes. Indeed, when the water content is at its low level (15 %), the evaporation of water requires higher temperature (higher energy) allowing the evaporation of the water allowing therefore a significant expansion of the product reaching a maximum of 3.8. Moreover, since mango cubes do not contain much water (15 %), they can keep their expanded state even after the treatment since the product is not very viscoelastic due to the low water content. However, when the product contains higher water content (30 %) even at a very low-pressure level a high expansion ratio around (≈ 3) is obtained but a shrinking and a collapse of the structure after the treatment will be observed. In fact, as explained previously the high-water content seems to reduce mango cubes hardening temperature to a lower value than the equilibrium temperature after pressure drops. This

phenomenon leads to a decrease in the cubes volume induced by the large amount of generated steam during decompression, or to the collapse of the structure of the cubes after expansion. To conclude, the obtained results showed that the IVDV process effectively increased the expansion ratio of mango cubes when comparing those dried with conventional hot-air drying.

Hardness

Texture measurements were conducted on the IVDV treated and the hot-air dried mango cubes, to evaluate and compare their hardness perceived while chewing. The hardness of IVDV treated mango cubes, varied between 4.97 and 13.58 N while the hardness of the hot-air dried mango cubes was 19.43 N. These obtained values shows that the hardness of IVDV treated mango cubes are lower than those dried conventionally.

The hardness of the cubes mostly varied with the linear negative effect of the pressure and time and the quadratic positive effect of the pressure according to the Pareto chart (figure 2 (d)).

Concerning the pressure, as presented in figure 2 (d), high pressure induced a decrease in the hardness of cubes. Indeed, as the pressure increases, the pressure / temperature drop increase upon decompression. Therefore, a higher amount of steam is generated inside the mango cubes causing a greater internal expansion leading to an intense alveolation and decreasing the hardness. The formed alveolus decreased the structure compactness and the cubes hardness, conferring them with a crunchy texture. However, the positive quadratic effect of the pressure shows that from 0.45 MPa the alveolation does not increase much and the hardness decreases only slightly. This quadratic effect of the pressure is concrete by the stabilization of the hardness starting 0.5 MPa (figure 2 di). Similar to the pressure, the treatment time affected also the hardness of mango cubes. The longer the cubes were treated the more their hardness decrease. Indeed, as explained previously for the expansion ratio, the rheological equilibrium is mandatory for cubes to expand and thus acquiring more alveolations and pores (Mrad et al., 2014a; Nader and Louka, 2018). As the processing time increases, a rheological equilibrium is reached and thus higher number of pores occurs accumulating a big quantity of steam inside the product. At the decompression, the mango cubes expanded and their hardness decrease. This explains the negative effect of the time of the hardness of mango cubes.

Finally, although all the expanded products presented a good texture, the preferable hardness values should be considered between 4 and 10 N since a crunchy texture is obtained. Indeed, when the a hardness beyond 10N, the product becomes barely hard and below 4 N the product

is brittle, friable and more likely to suffer physical damage (figure 2 (e and f) colored region) (Nader et al., 2016c).

Hence, treating mango cubes with the IVDV process induces a decrease in the hardness and a formation of alveolations and pores indicating that the treated mango cubes obtained a soft texture after the post-drying.

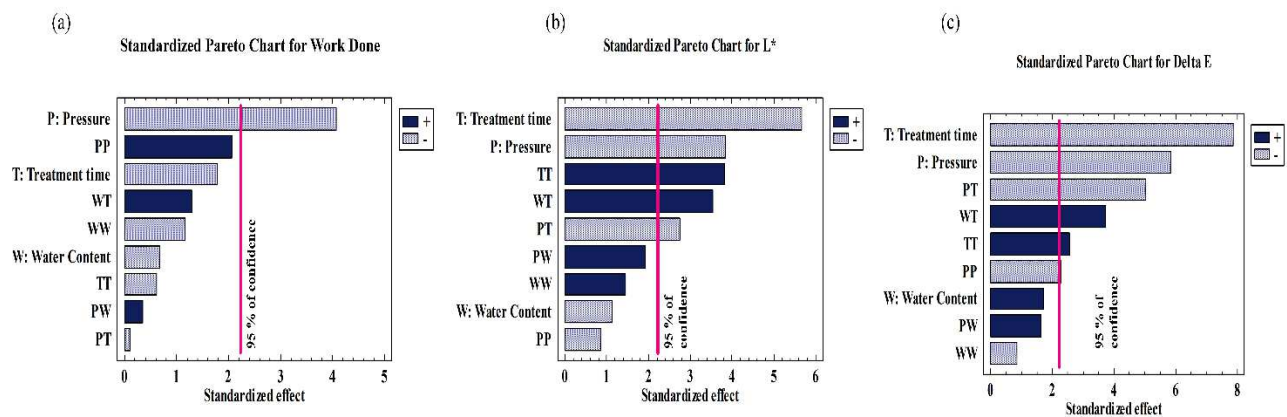


Figure 3: Standardized Pareto charts for (a) the Work done, (b) the luminance L^* and (c) the total color change (ΔE).

Quantity of fracture and Work done

Texture measurements allowed us to study two other parameters: the quantity of fracture (QF) and Work done (WD). Concerning the work done after expansion, based on the Pareto chart presented in figure 3 (a) only the linear and quadratic effect of the pressure and the linear effect of the time seemed significant. All these parameters and their response surfaces varied in the same way as for the hardness. In fact, the harder is the cube, the more work is required to overcome the internal structural strength of the bonds within the mango cubes. As a matter of fact, mango cubes dried conventionally with hot air-drying required a work done around 1000 mJ compared to an average of 73.7 mJ for all expanded mangos cubes.

The very high value of the work done obtained on the dried product (14 times more) clearly explains rubbery texture aspect of the latter. Indeed, figure 4 (a and b) confirms this observation, since the maximum force to break hot-air dried mangos, reached was around 60 N whereas the maximum force was around 9N for the IVDV treated cubes.

Finally, the quantity of fracture (QF) representing the crunchiness of the cubes didn't not show a significant response in the experimental design. This can be due to the fact that in the range of variation of the operating parameters (pressure, water content and treatment time) chosen in

this study and whatever the combination of these parameters, the product presents a very crunchy texture (number of peaks ranging from 17 to 26).

The average of the fractures (number of peaks) for the treated dried mango cubes was 24 whereas the untreated mango presented approximately 1 fracture. Indeed, as presented in the graphs (figure 4 (b)) the expanded mango cubes presented several peaks and a smaller surface (work done) comparing to the hot air-drying (figure 4 (a)). This result indicates that the expanded products presented, by far, a higher crunchiness. These obtained results confirm the results obtained on the hardness and indicate that the treated mango cubes present a crunchy texture.

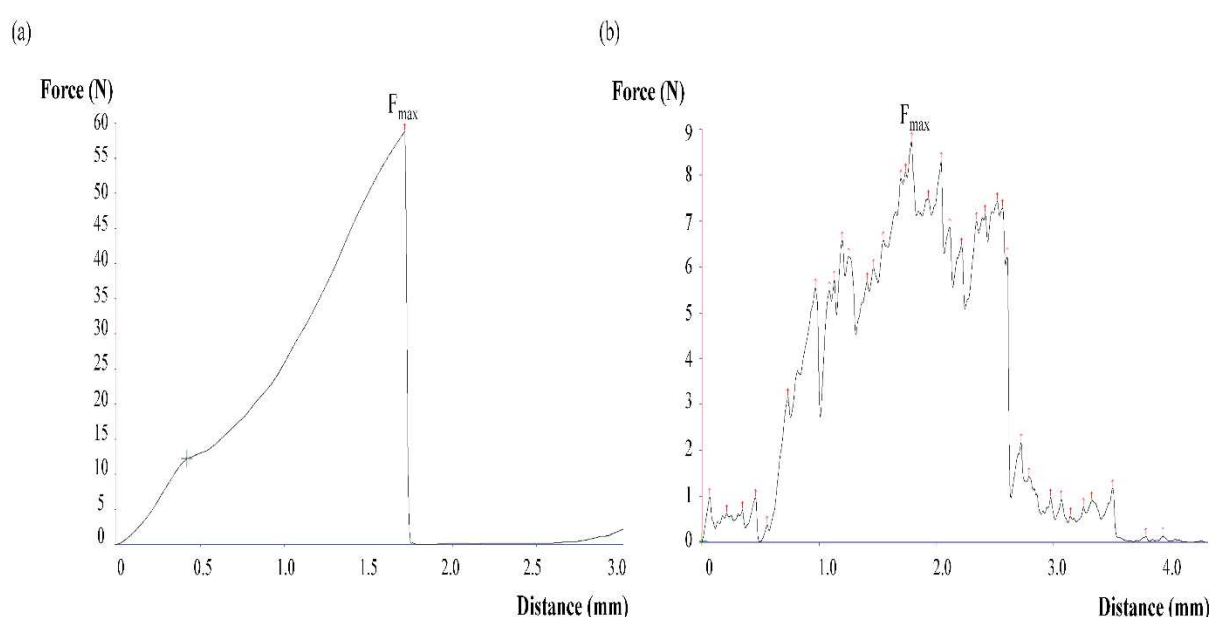


Figure 4: The maximum compression force (F_{max} , N) required to shear (a) a treated mango cube with IVDV and (b) a hot-air dried mango cube as a function distance (mm) traveled by the probe.

Color

Evaluation of the color of dried mango cubes is one of the methods of evaluating their quality. Analyses for the hot-air dried mangos and the differently treated mango cubes for L^* , a^* , b^* and ΔE showed that final samples differed significantly in color (figure 6). As presented in figure 6, the IVDV treatment significantly improved the color of the cubes by makes them lighter than those dried with hot-air drying. In the experimental design only significant effect of the operating variables was observed on L^* and ΔE . Therefore, results concerning these two components will be presented in the following.

The IVDV treated mango cubes presented values of L^* varying between 66.54 and 75.70 comparing to 57.98 for the conventionally hot-air dried mango cubes. This obtained result shows that the IVDV process significantly impacted the luminance of mango cube and therefore attributed to the latter a lighter color.

The Luminance L^* was significantly impacted with the linear negative effect of the time, pressure and the positive quadratic effect of the time. It was also affected by the interactions water content/ pressure and pressure/ time (figure 3 (b)). The luminance decreased with the increase of either the time or the pressure. Indeed, the luminance was at its highest value when both the pressure and the time were at their lowest values. Thus, the products tended toward a lighter color.

The high pressure inducing an elevation of the temperature for a certain time, might cause, according to (Louka et al., 2004), color modification of the product. Moreover, the time that the product is exposed to high temperature must be kept very short to protect its color (Louka and Allaf, 2004). Indeed, a prolongation of the treatment time under high pressure and high temperature can activate the browning reactions of Maillard, consequently inducing a brown color to the cubes. Thus, the pressure and time can be considered the main precursor of color development during the IVDV treatment. To this end, the pressure and the time should be applied in this case at not very high values. Concerning the interaction pressure/time when the pressure and the treatment time are both at their highest level, a considerable and quite important decrease of L^* (very dark color) due to the conjugation of high pressure/high temperature and long duration. The interaction water content/ time seems to have a negative effect on the color especially when the product contains low water content. Indeed, the water might protect the color of the cubes when exposed to long treatment duration as explained by (Louka et al., 2004)

The total color change (ΔE), represented in this study the distance between the color of the expanded mango and those only dried with conventional hot-air drying. The ΔE was significantly impacted with the linear negative effect of the time, pressure, the positive quadratic effect of the time indicating a stabilization trend. It was to a less extent affected by the interactions water content/ time and pressure/ time (figure 3 (c)). Indeed, when the pressure or the treatment time are at their highest level the total color change increase indicating a darker color of the product. The values of the ΔE varied between 14 and 20 with an average of 17.83 average indicating that all treated cubes presented a lighter color with yellowish-orange color comparing to a darker color obtained in the non-treated one. To this end, the IVDV process significantly changed the color of mango cubes comparing to the conventional hot-air drying.

Thus, treating mango cubes with this novel thermomechanical process confers to the cubes a more appealing color.

Multiple optimization

A simultaneous optimization of all the response variables was a mandatory step to obtain a compromise between the experimental parameters in order to acquire a product with the best overall acceptability. This multiple optimization will allow to find a set of operating conditions that optimized as best as possible all the responses or at least kept them in the desired ranges. Each response parameter was optimized separately and the variables standing for the optimums were revealed in Table 3. The main purpose of this study was to maximize the Expansion ratio (ER) while keeping the hardness (HARD) in the optimal region and maximizing the total color change (ΔE) of mango cubes. Therefore, a graphical multiple response optimization was used to determine the workable optimum conditions for IVDV treatment of the mango cubes. The contours plot of the expansion ratio and the hardness and total color change delta were superposed by fixing W at its optimum level around 18 %% d.b. (Figure 5).

Fig. 5 shows the final optimum that best satisfy all the constraints pointed out by an orange dot. Compromises between the ER, the hardness and the total color change (ΔE) lead to the best combination of IVDV parameters (W =18.58%, P= 0.53 MPa, t= 18.82 s) while achieving the highest desirability value of 96.24%.

Table 2: Optimum values of responses parameters resulting from separate and multiple optimization.

Responses parameters	A-Single Optimization			Predicted optimums	B-Multiple optimization			Predicted optimums
	W (%)	P (MPa)	t (s)		W (%)	P (MPa)	t (s)	
ER	18.57	0.57	26.02	3.79	18.58	0.53	18.82	3.59
Hardness (N)	10.20	0.62	35.11	3.64				7.51
ΔE	9.88	0.50	9.88	23.56				17.88

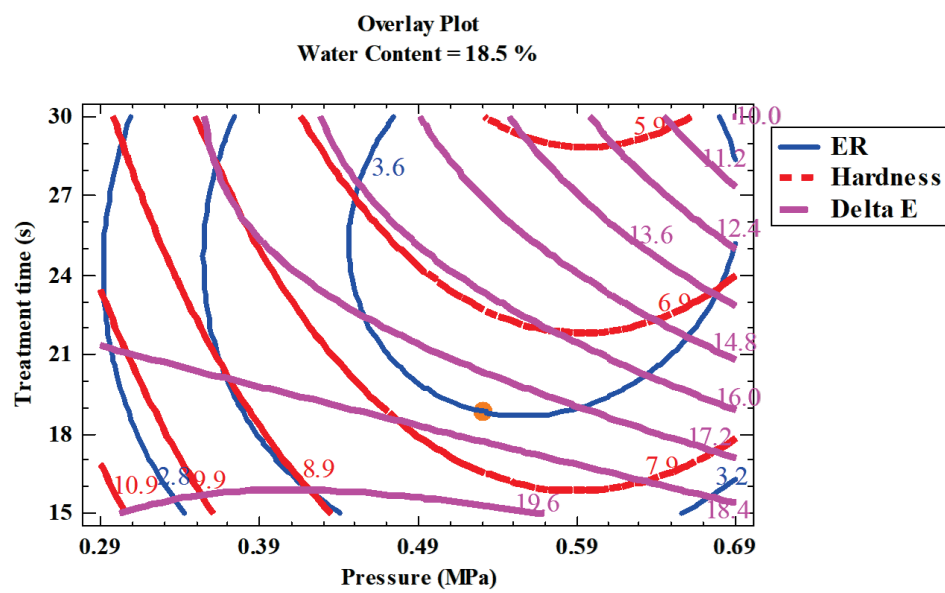


Figure 5: The overlay plots of the outline superposition of all the response parameters at a water content of 18.5%.

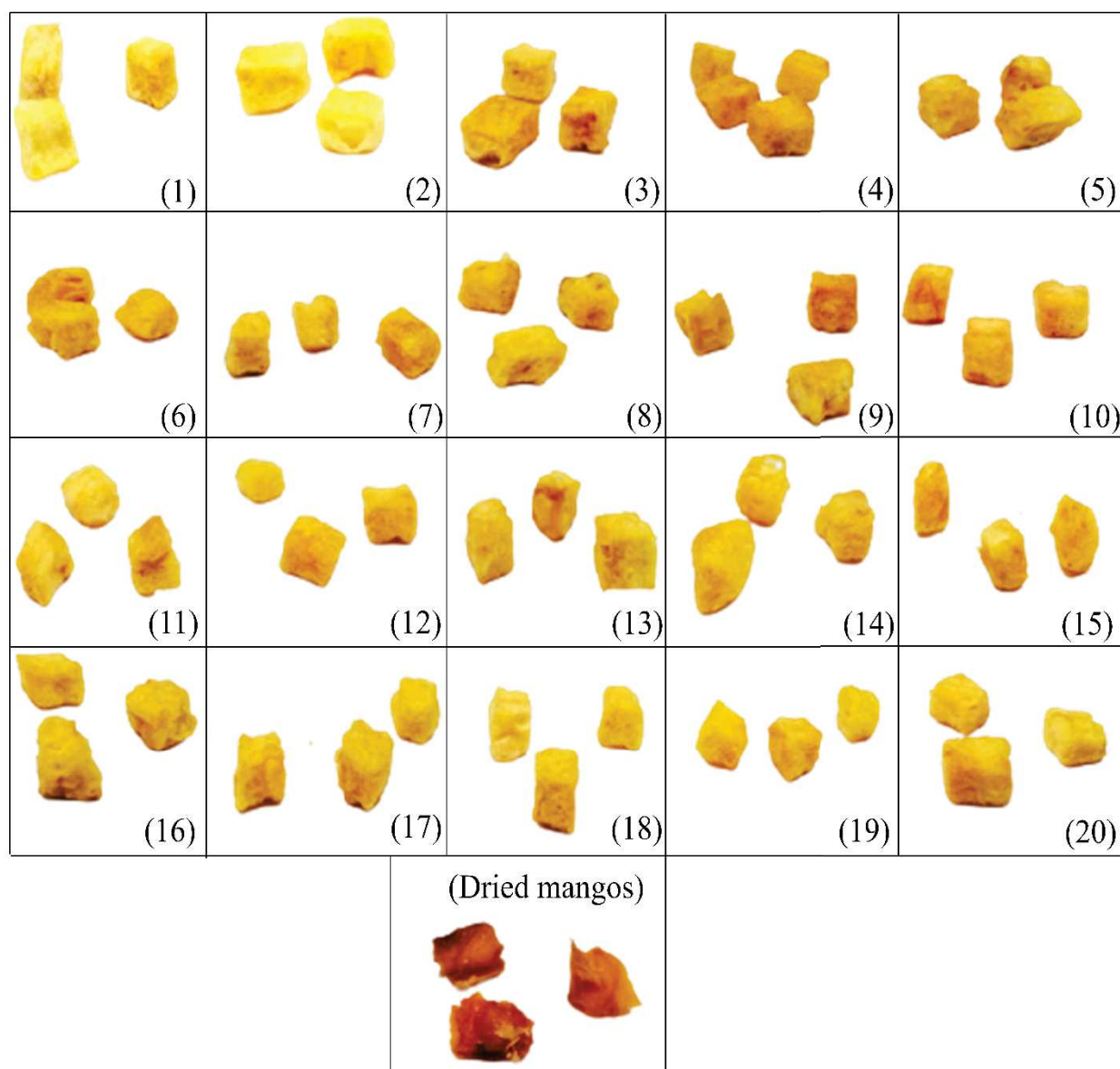


Figure 6: Photos of IVDV treated mango cubes according to the experimental plan.

Conclusion

The aim of this study consisted in investigating the use of the IVDV as a treatment applied during conventional hot-air drying allowing, dried mangos to regain their original shape and volume and obtaining better structural, textural and color qualities. To this end, the effect of the treatment parameters (saturated steam pressure (P), initial water content (W) and processing time(t)) on the shape, texture and color (Expansion ratio, hardness, Work done, number of peaks and color) were study using response surface methodology. Results showed firstly that the RSM was revealed accurate for optimizing IVDV process conditions for a simultaneous maximization and minimization of many response parameters at a time. In addition, results

showed that the IVDV process effectively increased the expansion ratio of mango cubes decreased their hardness and provided them with a crunchy texture comparing those dried with conventional hot-air drying. In addition, the IVDV significantly improved the color of the mango cubes. Indeed, the mango cubes presented a crunchy texture due to the formation of alveolations and pores as well as a much lighter color than those dried only by hot air. Finally, the use of optimal IVDV conditions ($W = 18.58\%$, $P = 0.53$ MPa, $t = 18.82$ s) will considerably improve the texture and color of the dried mango cubes.

To this end, this new thermomechanical IVDV process significantly improved the appearance of the mango cubes by increasing their volume, reducing their hardness and improving their colors. This process will allow proposing a new valorization path for excessive mangos.

2.3. Application de l'IVDV sur un lot de mangues mûres

Les résultats obtenus et présentés dans le projet de publication (section 2.2.), confirment la possibilité de mettre en place le nouveau procédé de texturation IVDV pour proposer de nouveaux produits de la mangue sous forme de chips croustillants. Les résultats ont montré que, pour des mangues avec des stades de maturation compris entre 0 et 10 jours, l'IVDV permet de corriger certains défauts de qualité des produits séchés. En effet, l'application de l'IVDV lors du séchage classique par air-chaud a permis d'augmenter le taux d'expansion et de diminuer la dureté des cubes de mangue, en comparaison aux mangues séchées conventionnellement. De plus, les cubes de mangues traités par IVDV présentent une texture crouillante due à la formation d'alvéoles et de pores. Une amélioration nette de la couleur des cubes traités par IVDV (disparition de la couleur brune) a aussi été observée. Par conséquent, l'utilisation de ce nouveau procédé thermomécanique de texturation au cours du séchage classique par air-chaud permet l'obtention de mangues séchées dotées de propriétés organoleptiques (texture et couleur) beaucoup plus attirantes.

Étant donné qu'un des objectifs de ce travail de thèse est de proposer une nouvelle voie de valorisation des mangues très mûres (non-valorisables en purée), il s'avère important de s'assurer de l'applicabilité de ce procédé sur un nouveau lot de mangues dont les stades de mûrissement sont plus avancés (entre 10 et 20 jours de mûrissement). Pour confirmer la possibilité d'utiliser ce procédé pour améliorer texture, forme et couleur des mangues séchées provenant de fruits très mûrs, une application du procédé IVDV sur un lot de 20 mangues *Mangifera Indica* cv. Kent du Brésil, présentant un stade de maturation variant entre 10 et 20

jours a été réalisée. Les mangues ont été traitées et analysées selon les mêmes conditions opératoires précédemment décrites (cf. section 2 dans la partie matériels et méthodes).

2.3.1 Effets des variables indépendantes sur les paramètres de réponse

Taux d'expansion

Le procédé IVDV appliqué sur le deuxième lot de mangues (stades de maturation entre 10 et 20 jours) a également permis d'augmenter efficacement le volume des cubes de mangue. En effet, les valeurs du taux d'expansion des cubes de mangues mûres étaient également supérieures à 1 et variaient entre 1,37 à 3,46 (réf. Annexe 3).

Le diagramme de Pareto présenté dans la figure 24 indique que la pression (effet linéaire et quadratique) et le temps (effet linéaire) semblent avoir un impact significatif ($p\text{-value} < 0.05\%$) sur le taux d'expansion des cubes de mangues. Les interactions teneur en eau/pression et teneur en eau/temps ont faiblement influencé le taux d'expansion. Le diagramme de Pareto a révélé, comme pour les mangues du premier lot de mûrissement (0-10 jours), que la pression est le paramètre le plus significatif comparé au temps de traitement et aux autres interactions. Dans ce cas, les effets de la pression et du temps sur le taux d'expansion des cubes de mangue peuvent être expliqués comme précédemment dans le projet de publication (§ Expansion Ratio).

Sur la base des résultats obtenus, il est donc possible d'améliorer le volume et la forme des mangues séchées très mûres en les traitant par IVDV.

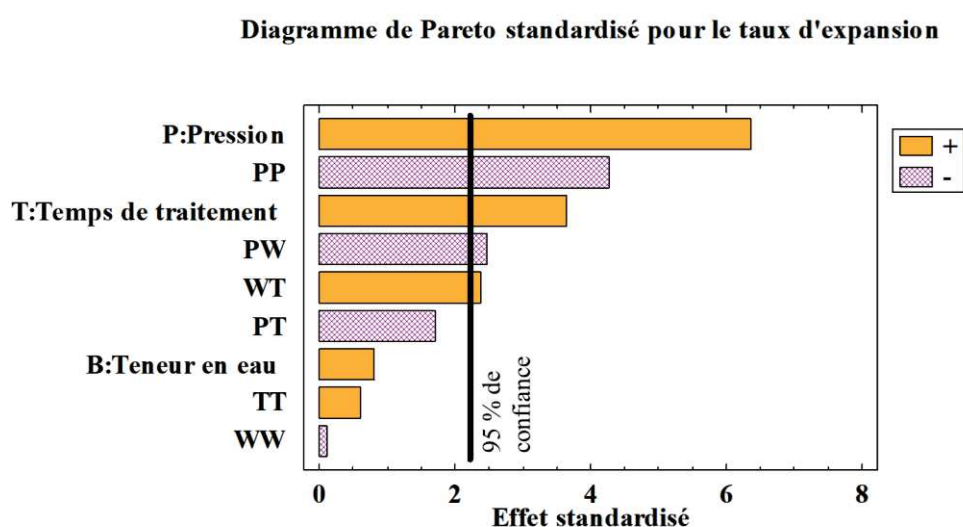


Figure 24 : Diagramme de Pareto standardisé pour le taux d'expansion.

Dureté

La dureté des cubes de mangues provenant du deuxième lot traité par IVDV variait de 6,35 et 15,15 N alors que les cubes de mangue séchés à l'air chaud présentaient une dureté de 41,05 N (cf. Annexe 3).

Selon le diagramme de Pareto (figure 25), la pression et le temps (effets linéaires) ont un effet négatif important sur la dureté des cubes. L'effet de ces deux paramètres sur cette réponse peut être expliqué comme précédemment dans le projet de publication (§ Hardness).

Ainsi, le traitement par IVDV des cubes de mangues provenant du deuxième lot induit une diminution de la dureté et une formation d'alvéoles et de pores. Ces résultats confirment la possibilité d'utiliser le procédé IVDV sur des mangues mûres pour réduire la dureté des produits séchés expansés et améliorer leur croustillance.

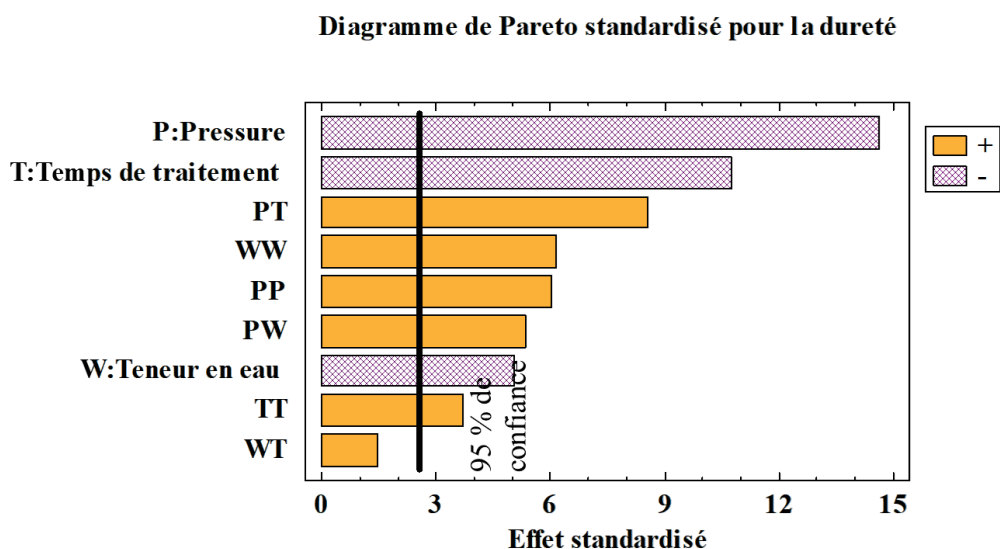


Figure 25 : Diagramme de Pareto standardisé pour la dureté.

Couleur

La couleur des cubes de mangues séchés du deuxième lot est définie par le paramètre ΔE , représentant la distance entre deux couleurs placées dans cet espace couleur. Selon le diagramme de Pareto présenté dans la figure 26, cette réponse a été significativement impactée par les effets négatifs linéaires de la teneur en eau, du temps et de la pression. De plus, cette réponse a été influencée par l'effet quadratique positif du temps et l'interaction pression/temps. Comme expliqué dans le projet de publication (§ Color), lorsque la pression ou le temps de traitement sont à leur niveau le plus élevé, le changement total de couleur augmente indiquant

un produit avec une couleur plus foncée. Les valeurs du ΔE varient entre 25 et 35 avec une moyenne de 30,76 (réf. Annexe 3). Ces valeurs sont nettement supérieures à celles obtenues sur le lot de mangues ayant un stade de maturation entre 0 et 10 jours (lot 1). En effet, une couleur très foncée est obtenue lors du séchage des mangues mûres. Ainsi, ces résultats montrent l'amélioration assez importante de la couleur des mangues mûres indiquant que tous les produits traités par IVDV ont présenté une couleur plus claire, plus attrayante, par rapport aux produits séchés conventionnellement à l'air chaud et non traités par IVDV.

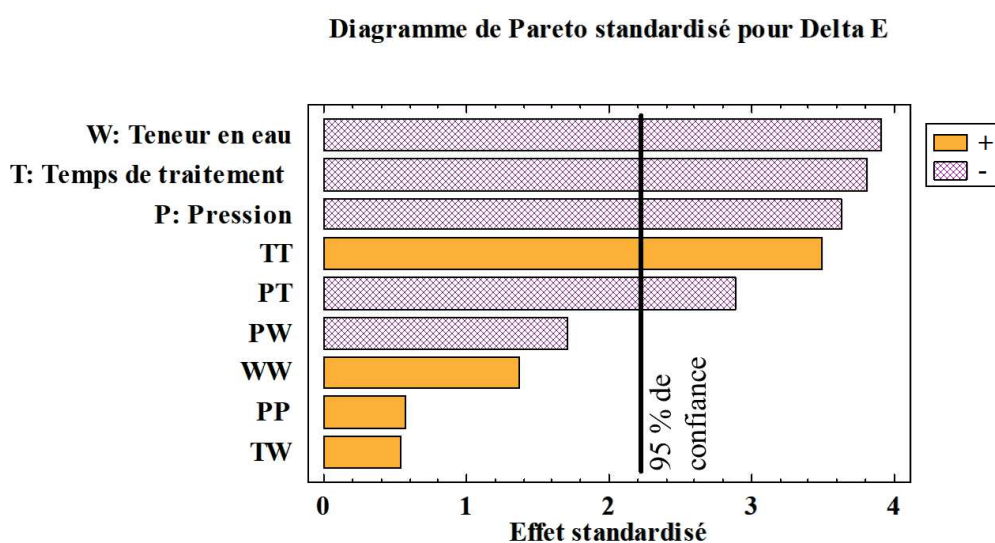


Figure 26 : Diagramme de Pareto standardisé pour ΔE .

Optimisation multiple

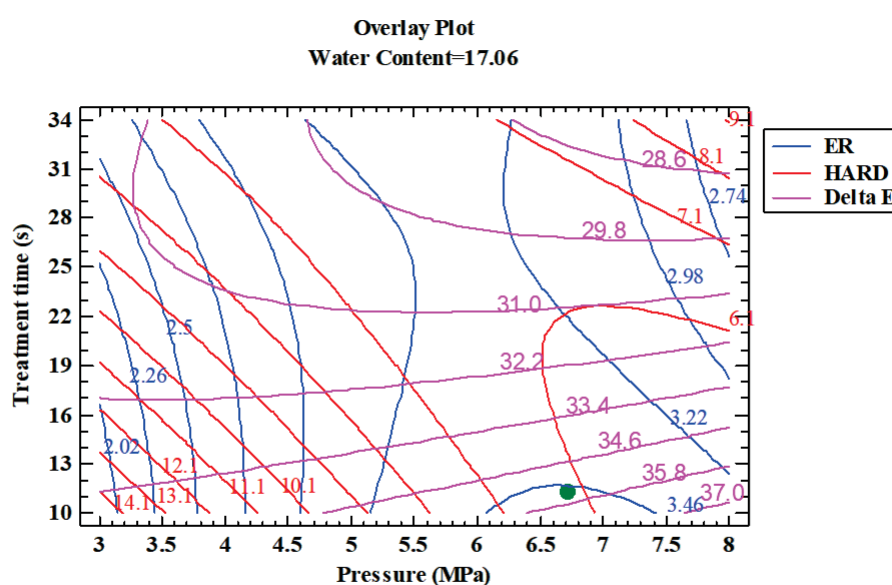
L'optimisation multiple des 3 paramètres réponses nous a aussi permis pour le deuxième lot de mangue de trouver un compromis entre ces paramètres afin d'obtenir un produit acceptable en terme de texture, forme et couleur. Chaque paramètre réponse a été optimisé séparément et les variables correspondant aux optimums sont indiquées dans le tableau 8. Comme pour le premier lot, le but était de maximiser le taux d'expansion (ER) tout en maintenant la dureté (HARD) dans la région optimale et de maximiser le changement de couleur total (ΔE) des cubes de mangues. La figure 27 présente le graphique des contours superposés du taux d'expansion, de la dureté et du changement total de couleur ΔE en fixant la teneur en eau à son niveau optimal autour de 17 % d.b.

Le compromis entre le taux d'expansion, la dureté et le changement total de couleur (ΔE) a mené à cette meilleure combinaison de paramètres : W = 17,06%, P = 0,67 MPa, t = 11,26 s, permettant d'obtenir 96,24% de désirabilité. Il est intéressant de noter que les valeurs optimales

des paramètres réponses obtenues sur le second lot sont proches de celles obtenues sur le premier lot de mangues vertes. De plus, le compromis des 3 paramètres réponses permet même pour les mangues mûres d'obtenir des cubes croustillants, volumineux et de couleur plus claire que pour les mangues séchées classiquement.

Tableau 8 : Valeurs optimales des paramètres réponses résultant de l'optimisation simple et multiple

Paramètres réponses	A- Optimisation simple			Optimums prédits	B- Optimisation multiple			Optimums prédits
	W (%)	P (MPa)	t (s)		W (%)	P (MPa)	t (s)	
ER	35.11	0.39	35.11	4.14	17.06	0.67	11.26	3.47
Dureté (N)	19.50	0.70	14.92	5.74				6.24
ΔE	9.88	0.66	9.88	41.45				35.47



plus croustillante due à la formation d'alvéoles ainsi qu'une couleur beaucoup plus claire que ceux séchés uniquement à l'air chaud. De plus, les analyses statistiques ont permis d'optimiser les conditions opératoires de l'IVDV permettant d'obtenir un compromis entre la texture et la couleur des cubes de mangue séchés. En conclusion, l'application de ce nouveau procédé thermomécanique IVDV a permis de proposer une voie de valorisation des mangues, notamment les plus mûres (10 – 20 jours de maturation), sous forme de cubes croustillants et ainsi de réduire les pertes post-récolte

Conclusions générales et perspectives

Conclusions et perspectives

Ce travail de recherche, mené dans le cadre du projet INTERFACES, ciblait l'étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'une nouvelle voie de transformation pour l'optimisation de la qualité des produits transformés, qu'il s'agisse de purées ou de mangues séchées.

La première partie de ce travail avait pour but d'étudier l'effet du mûrissement des mangues sur les propriétés physiques, physico-chimiques et biochimiques de leur purée, et ce afin d'identifier des indicateurs physiques pertinents. Dans un second temps, l'objectif était de développer un outil simple, rapide et non-destructif de prédiction de ces indicateurs, outil potentiellement utilisable lors du tri des mangues fraîches dans des unités de transformation des pays du Sud.

L'approche de compréhension ainsi que le développement de cet outil devrait permettre de mieux contrôler l'hétérogénéité du mûrissement au sein d'un lot de mangues, de mieux maîtriser la qualité des purées et ainsi de réduire les pertes post-récolte.

La deuxième partie de cette thèse avait pour but de proposer une nouvelle voie de valorisation de la mangue, sous forme de produits croustillants, en utilisant un nouveau procédé de texturation basé sur l'*Intensification de la Vaporisation par Détente vers le Vide* et ainsi dénommé IVDV. Cette nouvelle voie de valorisation concernait spécifiquement les mangues à un stade avancé de maturation, étant donné qu'elles représentent une part considérable des pertes post-récolte, en raison de leur courte durée de vie et de certains défauts organoleptiques. L'utilisation de ce nouveau procédé associé à une opération de séchage classique par air-chaud devrait permettre de transformer la mangue en de nouveaux produits séchés dotés d'une texture et d'une couleur beaucoup plus appréciées par le consommateur, tout en réduisant significativement les pertes post-récolte.

Afin d'atteindre les premiers objectifs fixés, une étude approfondie a été réalisée pour déterminer les propriétés physiques, physico-chimiques, granulométriques et rhéologiques des purées de mangues, relativement au stade de maturation du fruit.

Les résultats ont montré que pendant les 10 premiers jours de mûrissement, les purées de mangues sont caractérisées par une structure de gel avec un comportement solide dominant et

une force de réseau élevée. Une forte diminution de la viscosité dynamique, de la taille de particules et de l'énergie de cohésion spécifique des purées a été observée durant ces 10 premiers jours de mûrissement. Le couplage de mesures rhéologiques et spectroscopiques en moyen-IR, méthodologie innovante, ont mis en évidence la diminution simultanée du comportement solide (G') et de la teneur en saccharose, ainsi qu'une augmentation significative de la teneur en fructose suite à ces 10 jours de maturation. Il a été relevé l'intérêt du couplage rhéologie/moyen-IR dans la mesure où cette analyse couplée ne nécessite qu'un échantillon de taille réduite, et permettrait ainsi d'obtenir simultanément des informations rhéologiques et biochimiques combinées, notamment lors du mûrissement du fruit.

Après avoir compris et évalué l'impact du mûrissement sur les propriétés physiques et biochimiques des purées de mangues, l'objectif suivant consistait à développer un outil facile, rapide et non destructif pour trier les mangues non seulement en fonction de leur maturité mais aussi en fonction des propriétés spécifiques souhaitées de leur purée.

Les résultats ont montré que la fermeté des mangues, évaluée par un test de compression non destructif, est un excellent indicateur du mûrissement des mangues. Ce mûrissement, ayant un impact majeur sur la distribution en taille de particules et sur les propriétés rhéologiques (en écoulement et en dynamique) des purées, la fermeté des mangues fraîches devient, par conséquent, un indicateur de ces mêmes caractéristiques. Ainsi, il a été possible d'anticiper la taille des particules des purées de mangues à partir de l'évaluation de la fermeté du fruit frais par des tests de compression. Concernant les propriétés rhéologiques des purées (viscosité et comportement viscoélastique), le test de compression a permis également de discriminer les purées de mangues aux premiers stades de maturation (0-10 jours) des autres stades (11-25 jours). Un simple test de compression sur des mangues fraîches, test non destructif, est ainsi susceptible d'anticiper les propriétés physiques des purées obtenues après broyage du fruit frais.

Cette première partie du travail a apporté de nouvelles connaissances très utiles aux acteurs des filières de la mangue. Le lien entre maturation, fermeté du fruit et propriétés des purées met en exergue l'intérêt du développement d'un test de compression sur le fruit frais. Ce test, simple et non destructif, serait en effet d'un grand intérêt dans les unités de transformation pour sélectionner et trier les mangues, selon les objectifs ciblés.

Concernant la valorisation des mangues fraîches, notamment à un stade de maturation supérieur à 10 jours, peu adéquat à une consommation directe ou à une transformation en purée du fruit, il est proposé dans la suite du travail un traitement innovant aboutissant à un produit original. L'objectif de la deuxième partie du travail a ainsi été de proposer une nouvelle voie de valorisation de la mangue, sous forme de produits croustillants, en introduisant une étape de texturation durant le séchage conventionnel par air chaud. Cette étape de texturation par IVDV a pour objectif de réduire les effets indésirables du séchage en améliorant forme, texture et couleur des cubes de mangues séchées. L'optimisation de cette étape a été recherchée à l'aide notamment d'un plan d'expériences et d'une méthodologie de surface de réponse. L'effet des paramètres de traitement (pression de vapeur saturante (P), teneur en eau initiale (W) et temps de traitement (t)) sur la forme, la texture et la couleur des cubes de mangues a ainsi été étudié. Les résultats obtenus ont montré que le procédé IVDV permet de significativement augmenter le taux d'expansion des cubes de mangues mûres tout en diminuant la dureté par rapport aux cubes séchés uniquement à l'air chaud. De plus, l'IVDV a amélioré de manière significative la couleur du produit séché. Ainsi, les cubes de mangue, après séchage par air-chaud et traitement IVDV, présentent une texture croustillante due à la formation d'alvéoles et de pores, ainsi qu'une couleur beaucoup plus claire.

Les résultats obtenus ont ainsi démontré que ce nouveau procédé thermomécanique s'avère extrêmement prometteur et offre aux transformateurs une nouvelle voie de valorisation des mangues, notamment celles dont le stade de maturation est particulièrement avancé, permettant par conséquent une réduction des pertes post-récolte.

Suite à ce travail, certaines questions restent ouvertes et de nombreuses perspectives de recherche peuvent être envisagées afin d'approfondir notre approche.

Concernant l'optimisation de la qualité des purées de mangues :

- Il pourrait être intéressant d'identifier, à une échelle macromoléculaire, en complétant l'approche biochimique amorcée dans ce travail, les mécanismes qui déterminent la fragmentation tissulaire au cours du mûrissement des mangues et de lier ces changements aux propriétés physiques des purées afin d'en améliorer la maîtrise.
- Il pourrait être envisagé de modifier les conditions de broyages, modifiant ainsi par une action mécanique l'intégrité tissulaire voire cellulaire, et en étudier l'impact sur la

texture de la purée. Cette perspective pourrait également être à l'origine de textures innovantes de purées de mangues.

- Sachant que les purées, avant d'être commercialisées, subissent une pasteurisation, l'influence d'un tel traitement thermique sur les propriétés physiques des purées pourraient être d'un grand intérêt.
- Dans notre étude, les conditions de mûrissement ont été choisies sur la base de travaux antérieurs réalisés au Cirad. Cependant, il s'avèrerait pertinent de varier ces conditions d'affinage (e.g. température et humidité relative) pour élargir la compréhension de l'effet du mûrissement sur les propriétés physiques et biochimiques des purées.
- La réalisation d'analyses sensorielles sur les purées permettrait d'associer propriétés physiques et organoleptiques, et ce afin de répondre aux attentes des consommateurs.
- Enfin, cette approche pourrait être élargie à d'autres fruits à noyau et ce afin d'en démontrer la robustesse.

En ce qui concerne nos travaux sur les mangues séchées expansées, les pistes de recherche envisagées sont également nombreuses :

- Il serait dans un premier temps indispensable de poursuivre les travaux pour valider les résultats obtenus aux points optimaux détectés.
- Une étude des profils polyphénolique et vitaminique, suite à un traitement par IVDV, s'avèrerait nécessaire pour s'assurer que ce type de traitement conserve les propriétés nutritionnelles du produit séché.
- Il serait intéressant d'observer à l'aide d'outils d'imagerie (e.g. micro tomographie, microscopie électronique...) les modifications structurelles qui ont lieu à l'intérieur des mangues. Ces observations permettraient une meilleure compréhension de la formation d'alvéoles au sein des mangues séchées lors du traitement par IVDV.
- Dans ce cas également, la réalisation d'analyses sensorielles sur les mangues séchées expansées s'avèrerait indispensable pour mieux répondre aux attentes des consommateurs.

Annexes

ANNEXE 1 : Détermination des jours de maturation des mangues utilisées pour la réalisation campagne de mesure : Séchage et texturation

L'outil de tri, non destructif, proposé dans la première publication <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.013>, a été utilisé pour estimer les jours de maturation des mangues utilisées pour la campagne de mesure « Séchage et expansion ». L'estimation des jours de maturation a été effectuée en utilisant l'équation du modèle mathématique (régression linéaire) obtenu lors du développement de cet outil et permettant de relier la distance parcourue par la sonde D_{5N} (variable explicative) lors du test de compression non destructif au nombre de jours de maturation (variable à prédire) :

$$y = 0.0814x + 0.5735$$

Avec y la distance parcourue par la sonde D_{5N} lors du test non destructif de compression (variable explicative) et x le nombre de jours de maturation (variable à prédire).

Tableau 9 : Prédiction des jours de maturation des 40 mangues utilisées pour le séchage, selon le modèle mathématique basé sur les valeurs des distances parcourues par la sonde (D_{5N}) mesurées lors du test de compression non destructif réalisé le jour de l'achat (J₀) et après 10 jours de stockage (J₁₀).

Mangues	D _{5N}		Prédiction du jour de maturation	
	J ₀	J ₁₀	J ₀	J ₁₀
1	0.825		3	
2	0.654		1	
3	0.884		4	
4	0.796		3	
5	1.078		6	
6	0.988		5	
7	0.689		1	
8	1.112		7	
9	0.721		2	
10	1.231		8	
11	0.994		5	
12	1.254		8	
13	1.227		8	
14	1.021		5	
15	1.114		7	
16	1.391		10	

Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées

17	1.416		10	
18	1.327		9	
19	1.298		9	
20	1.357		10	
21	0.875	1.574	4	12
22	0.776	1.488	2	11
23	1.025	1.737	6	14
24	1.11	1.739	7	14
25	0.994	1.475	5	11
26	0.631	1.654	1	13
27	0.821	1.541	3	12
28	0.762	1.787	2	15
29	1.241	1.812	8	15
30	0.999	1.745	5	14
31	0.912	1.817	4	15
32	1.127	1.867	7	16
33	1.025	1.894	6	16
34	1.365	1.924	10	17
35	1.369	2.004	10	18
36	1.316	2.057	9	18
37	0.984	2.084	5	19
38	0.632	2.112	1	19
39	1.361	2.189	10	20
40	1.002	2.189	5	20

ANNEXE 2 : Analyse statistique (ANOVA) : Choix de la sonde utilisée lors des mesures de texture (campagne de mesure : Séchage et texturation)

Tableau 10 : Analyse de la variance pour les valeurs de la force max ($F_{\max}$) lors de l'utilisation de la sonde « lame de couteau artisanal »

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	128.583	42.861	5.499	0.009
Erreur	16	124.710	7.794		
Total corrigé	19	253.294			

Tableau 11 : Analyse de la variance pour l'aire sous le pic représentant l'énergie (WD) lors de l'utilisation de sonde la « lame de couteau artisanal »

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	29941.043	9980.348	25.318	< 0.0001
Erreur	15	5913.107	394.207		
Total corrigé	18	35854.150			

Tableau 12 : Analyse de la variance pour les valeurs de la force max ($F_{\max}$) lors de l'utilisation de la sonde « sphérique »

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	350.698	116.899	0.394	0.758
Erreur	36	10684.236	296.784		
Total corrigé	39	11034.934			

Tableau 13 : Analyse de la variance pour l'aire sous le pic représentant l'énergie (WD) lors de l'utilisation de sonde « sphérique »

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	95936.523	31978.841	1.494	0.252

Erreur	17	363811.713	21400.689
Total corrigé	20	459748.236	

ANNEXE 3 : Matrice du plan d'expérience et résultats

obtenus pour les mangues provenant du stade de maturation avancé

Tableau 14 : Le plan composite centré avec les combinaisons de variables indépendantes : la vapeur saturante (P), la teneur en eau initiale (W) et le temps de traitement (t) et les paramètres réponses : taux d'expansion (ER), dureté (HARD) et la distance entre deux couleurs (ΔE) des cubes de mangue mûres traités par IVDV.

Essais		Niveaux des variables non codés			Paramètres de réponse		
		P (MPa)	W (%)	t (s)	ER	HARD	ΔE
Mangues mûres séchées		-	-	-	1	41.05	0.00
1	Points Factoriels	0.3	15	15	2.15	15.15	32.95
2		0.6	15	15	3.14	8.03	35.24
3		0.3	30	15	2.01	11.7	32.94
4		0.6	30	15	2.7	7.52	29.45
5		0.3	15	30	2.32	9.44	31.23
6		0.6	15	30	3.26	6.84	29.62
7		0.3	30	30	3.46	7.01	30.92
8		0.6	30	30	3.09	6.74	25.86
9	Points axiaux	0.2	22.5	22.5	1.37	9.11	32.65
10		0.7	22.5	22.5	3.25	6.35	28.32
11		0.45	9.9	22.5	2.93	7.77	34.74
12		0.45	35.1	22.5	3.11	7.75	31.14
13		0.45	22.5	9.9	2.86	7.57	32.16
14		0.45	22.5	35.1	3.43	6.69	30.14
15	Points Centraux	0.45	22.5	22.5	3.11	6.89	30.00
16		0.45	22.5	22.5	2.89	6.58	30.68
17		0.45	22.5	22.5	3.09	7.18	30.00
18		0.45	22.5	22.5	2.77	7.41	30.64
19		0.45	22.5	22.5	3.13	7.45	27.61
20		0.45	22.5	22.5	3.08	6.82	28.88

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- Abi-Khattar, A.-M., Rajha, H.N., Abdel-Massih, R.M., Habchi, R., Maroun, R.G., Debs, E., Louka, N., 2020. “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV), a novel technology applied as a pretreatment to improve polyphenols extraction from olive leaves. *Food Chem.* 128236. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128236>
- Agati, G., Pinelli, P., Ebner, S.C., Romani, A., Cartelat, A., Cerovic, Z.G., 2005. Nondestructive evaluation of anthocyanins in olive (*Olea europaea*) fruits by in situ chlorophyll fluorescence spectroscopy. *J. Agric. Food Chem.* 53, 1354–1363. <https://doi.org/10.1021/jf048381d>
- Agri Logic, 2019. Analyse de la chaîne de valeur des fruits transformés au Burkina Faso, au Mali et en Côte d’Ivoire. Rvo.
- Ahmed, J., Ramaswamy, H.S., 2006. Viscoelastic properties of sweet potato puree infant food. *J. Food Eng.* 74, 376–382. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.010>
- Ajila, C.M., Prasada Rao, U.J.S., 2013. Mango peel dietary fibre: Composition and associated bound phenolics. *J. Funct. Foods* 5, 444–450. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.11.017>
- Alazzawi, M.K., Rohn, C.L., Beyoglu, B., Haber, R.A., 2020. Rheological assessment of cohesive energy density of highly concentrated stereolithography suspensions. *Ceram. Int.* 46, 8473–8477. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.225>
- Albano, K.M., Franco, C.M.L., Telis, V.R.N., 2014. Rheological behavior of Peruvian carrot starch gels as affected by temperature and concentration. *Food Hydrocoll.* 40, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.02.003>
- Albitar, N., 2011. Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par détente instantanée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. application à la valorisation des déchets agro-alimentaire 193.
- Alvarez, M.D., Fernández, C., Canet, W., 2004. Rheological behaviour of fresh and frozen potato puree in steady and dynamic shear at different temperatures. *Eur. Food Res. Technol.* 218, 544–553. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-0897-2>
- Antal, T., 2015. Comparative study of three drying methods: Freeze, hot air-assisted freeze and infrared-assisted freeze modes. *Agron. Res.* 13, 863–878.

- Arnoldus, M., van der Pol, F., Ravry, C., 2011. Affaire juteuse ou déception amère: quel est l'avenir des produits dérivés de la mangue au Burkina Faso et au Mali ? 1–144.
- Auffret, A., Ralet, M.C., Guillon, F., Barry, J.L., Thibault, J.F., 1994. Effect of grinding and experimental conditions on the measurement of hydration properties of dietary fibres. LWT - Food Sci. Technol. <https://doi.org/10.1006/fstl.1994.1033>
- Azira, T.N., Man, Y.B.C., Mohd, R.N.R., Aina, M.A., Amin, I., 2014. Use of principal component analysis for differentiation of gelatine sources based on polypeptide molecular weights. Food Chem. 151, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.066>
- Barboza, H., Mamede, A., Brito, G., 2016. Postharvest Technology for Fresh Mangoes Complimentary Contributor Copy 1–177.
- Bello-Pérez, L.A., García-Suárez, F., Agama-Acevedo, E., 2007. Mango Carbohydrates. Food 1, 36–40.
- Berardini, N., Knödler, M., Schieber, A., Carle, R., 2005. Utilization of mango peels as a source of pectin and polyphenolics. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 6, 442–452. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.06.004>
- Boateng, C.N., 2016. Analysis of Post Harvest Losses in the Mango Marketing Channel in Southern Ghana 99.
- Bonneau, A., 2018. Étude de l'impact de la matrice d'un fruit sur la libération et la perception des composés d'arôme en condition in vivo : application à la mangue fraîche ou transformée To cite this version : HAL Id : tel-01726952 Délivré par l'Université de Montp.
- Bossard, F., Moan, M., Aubry, T., 2007. Linear and nonlinear viscoelastic behavior of very concentrated plate-like kaolin suspensions. J. Rheol. (N. Y. N. Y). 51, 1253–1270. <https://doi.org/10.1122/1.2790023>
- Braz, J., 2004. Panorama du marché international de la mangue : cas de la filière d'exportation du Brésil Jussara Braz.
- Brummell, D.A., 2006. Cell wall disassembly in ripening fruit. Funct. Plant Biol. 33, 103–119. <https://doi.org/10.1071/FP05234>
- Buergy, A., Rolland-Sabaté, A., Leca, A., Renard, C.M.G.C., 2020. Pectin modifications in raw fruits alter texture of plant cell dispersions. Food Hydrocoll. 107.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105962>
- Bureau, S., Cozzolino, D., Clark, C.J., 2019. Contributions of Fourier-transform mid infrared (FT-MIR) spectroscopy to the study of fruit and vegetables: A review. *Postharvest Biol. Technol.* 148, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.10.003>
- Bureau, S., Ruiz, D., Reich, M., Gouble, B., Bertrand, D., Audergon, J.M., Renard, C.M.G.C., 2009. Application of ATR-FTIR for a rapid and simultaneous determination of sugars and organic acids in apricot fruit. *Food Chem.* 115, 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.12.100>
- Cadet, F., Robert, C., Offmann, B., 1997. Simultaneous determination of sugars by multivariate analysis applied to mid-infrared spectra of biological samples. *Appl. Spectrosc.* 51, 369–375. <https://doi.org/10.1366/0003702971940224>
- Camps, C., Christen, D., 2009. Non-destructive assessment of apricot fruit quality by portable visible-near infrared spectroscopy. *LWT - Food Sci. Technol.* 42, 1125–1131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.01.015>
- Cancela, M.A., Maceiras, R., 2007. Rheological properties of fruit purees : Effect of cooking 80, 763–769. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.028>
- Canteri, M.H.G., Renard, C.M.G.C., Le Bourvellec, C., Bureau, S., 2019. ATR-FTIR spectroscopy to determine cell wall composition: Application on a large diversity of fruits and vegetables. *Carbohydr. Polym.* 212, 186–196. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.021>
- Cárdenas-Pérez, S., Chanona-Pérez, J.J., Güemes-Vera, N., Cybulska, J., Szymanska-Chargot, M., Chylinska, M., Koziół, A., Gawkowska, D., Pieczywek, P.M., Zdunek, A., 2018. Structural, mechanical and enzymatic study of pectin and cellulose during mango ripening. *Carbohydr. Polym.* 196, 313–321. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.044>
- Castrillo, M., Kruger, N.J., Whatley, F.R., 1992. Sucrose metabolism in mango fruit during ripening. *Plant Sci.* 84, 45–51. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(92\)90206-2](https://doi.org/10.1016/0168-9452(92)90206-2)
- Cepedaand, E., Gómez, R., 2002. Rheological characteristics of pimento purée: Theoretical interpretation. *J. Food Sci.* 67, 2734–2738. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08806.x>
- Chantalak, T., Robert E, P., 2017. Handbook of Mango Fruit. *Handb. Mango Fruit* 17–35.

<https://doi.org/10.1002/9781119014362>

- Chaux-Gutiérrez, A.M., Pérez-Monterroza, E.J., Mauro, M.A., 2019. Rheological and structural characterization of gels from albumin and low methoxyl amidated pectin mixtures. *Food Hydrocoll.* 92, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.025>
- Codex alimentarius, 2005. CODEX STAN 247 Page 1 de 19 1–19.
- Colin-Henrion, M., Cuvelier, G., Renard, C.M.G.C., 2007. Texture of pureed fruit and vegetable foods. *Stewart Postharvest Rev.* 3. <https://doi.org/10.2212/spr.2007.5.3>
- Cui, Z.W., Xu, S.Y., Sun, D.W., 2003. Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying. *Dry. Technol.* 21, 1173–1184. <https://doi.org/10.1081/DRT-120023174>
- Dahdouh, L., 2015. Contribution à la compréhension du colmatage membranaire lors de la microfiltration de jus de fruits : identification de leur potentiel colmatant.
- Dahdouh, L., Delalonde, M., Ricci, J., Ruiz, E., Wisniewski, C., 2018. Influence of high shear rate on particles size, rheological behavior and fouling propensity of fruit juices during crossflow microfiltration: Case of orange juice. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 48, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.006>
- Dahdouh, L., Wisniewski, C., Kapitan-Gnimdu, A., Servent, A., Dornier, M., Delalonde, M., 2015. Identification of relevant physicochemical characteristics for predicting fruit juices filterability. *Sep. Purif. Technol.* 141, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.030>
- Dahdouh, L., Wisniewski, C., Ricci, J., Vachoud, L., Dornier, M., Delalonde, M., 2016. Rheological study of orange juices for a better knowledge of their suspended solids interactions at low and high concentration. *J. Food Eng.* 174, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.008>
- Darsy, G., Bouzat, F., Muñoz, M., Lucas, R., Foucaud, S., Diogo, C.C., Babonneau, F., Leconte, Y., Maître, A., 2015. Monitoring a polycycloaddition by the combination of dynamic rheology and FTIR spectroscopy. *Polymer (Guildf)*. 79, 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.10.030>
- Day, L., Xu, M., Øiseth, S.K., Hemar, Y., Lundin, L., 2010. Control of Morphological and Rheological Properties of Carrot Cell Wall Particle Dispersions through Processing. *Food Bioprocess Technol.* 3, 928–934. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0346-0>

- Dea, S., Brecht, J.K., do Nascimento Nunes, M.C., Baldwin, E.A., 2013. Optimal ripeness stage for processing “Kent” mangoes into fresh-cut slices. *Horttechnology* 23, 12–23. <https://doi.org/10.21273/horttech.23.1.12>
- Debs-Louka, E., 2000. Destruction des micro-organismes par voie thermo-mécanique contrôlée dans des produits solides en morceaux ou en poudre : application aux épices et aromates. La Rochelle.
- Dejean, G., 2011. Caractérisation et conservation d’un nouveau système CUT associé à l’utilisation du xylane chez *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* : implications en écologie microbienne.
- Djantou Njantou Elie Baudelaire, 2006. Optimisation du broyage des mangues séchées (*Mangifera indica* var Kent) : Influence sur les propriétés physicochimiques et fonctionnelles des poudres obtenues.
- Djioua, T., Avignon, U.D., Des, E.T., Vaucluse, P.D.E., Coudret, M.A., Ducamp-collin, M.M.N., Reynes, M.M., Charles, M.F., 2010. Amélioration de la conservation des mangues 4 ème gamme par application de traitements thermiques et utilisation d ’ une co.
- Duarte, I.F., Barros, A., Delgadillo, I., Almeida, C., Gil, A.M., 2002. Application of FTIR spectroscopy for the quantification of sugars in mango juice as a function of ripening. *J. Agric. Food Chem.* 50, 3104–3111. <https://doi.org/10.1021/jf011575y>
- Dupaigne, P., 1965. Essais d’industrialisation de la mangue. *Fruits* 3–8.
- Elbandy, Mohamed A, Elbandy, M A, Abed, S.M., Gad, S.S.A., Abdel-Fadeel, M.G., 2014. Aloe vera Gel as a Functional Ingredient and Natural Preservative in Mango Nectar. *World J. Dairy Food Sci.* 9, 191–203. <https://doi.org/10.5829/idosi.wjdfs.2014.9.2.1139>
- Elong, E.N., Adenet, S., Rochefort, K., 2015. Physicochemical, Nutritional, Organoleptic Characteristics and Food Applications of Four Mango (<i>Mangifera indica</i>) Varieties. *Food Nutr. Sci.* 06, 242–253. <https://doi.org/10.4236/fns.2015.62025>
- Espinosa-muñoz, L., Renard, C.M.G.C., Symoneaux, R., Biau, N., Cuvelier, G., 2013. Structural parameters that determine the rheological properties of apple puree 119, 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.014>
- Espinosa-Muñoz, L., Symoneaux, R., Renard, C.M.G.C., Biau, N., Cuvelier, G., 2012. The

- significance of structural properties for the development of innovative apple puree textures. *LWT - Food Sci. Technol.* 49, 221–228.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.06.020>
- Espinosa Brisset, L.C., 2012. Texture de la purée de pomme : influence de la structure sur les propriétés rhéologiques et la perception sensorielle - effet du traitement mécanique 207.
- Espinosa, L., To, N., Symoneaux, R., Renard, C.M.G.C., Biau, N., Cuvelier, G., 2011. Effect of processing on rheological, structural and sensory properties of apple puree. *Procedia Food Sci.* 1, 513–520. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.078>
- Evans, E.A., 2008. Recent Trends in World and U.S. Mango Production, Trade, and Consumption. *EDIS Doc.*, Florida Coop. Ext. Serv. Inst. Food Agric. Sci. Univ. Florida, Gainesville, FL 107, 106–111.
- Evans, E.A., Ballen, F.H., Siddiq, M., 2017. Mango Production, Global Trade, Consumption Trends, and Postharvest Processing and Nutrition. *Handb. Mango Fruit Prod. Postharvest Sci. Process. Technol. Nutr.* 1–16. <https://doi.org/10.1002/9781119014362.ch1>
- Fao, 2010. Formation en gestion d'entreprises associatives rurales en agroalimentaire.
- FAO, 2020. Major Tropical Fruits: Market Review February 2020 24.
- FAO, 2019, 2019. Mango* production worldwide from 2000 to 2017 (in million metric tons) [WWW Document]. *Stat. Portal Stat. Stud.* from more than 22,500 Sources. URL <https://www.statista.com/statistics/577951/world-mango-production/>
- FAO, F. and A.O. of U.N., 2019. Prospect for global production bananas and tropical fruits 2019-2028 1–14.
- Fernández-Romero, J.M., Aguilar-Caballos, M.P., 2019. Fluorescence | Food applications, 3rd ed, *Encyclopedia of Analytical Science*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.00156-6>
- Flutto, L., 2003. Pectin - Properties and determination. *Encycl. Food Sci. Nutr.* 4440–4449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00901-9>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018. Food loss analysis : causes and solutions.
- FruiTrop, 2018. Mangue : Principales variétés. *FruiTrop Mag.* 88–90.
- Fuentes, L., Figueroa, C.R., Valdenegro, M., 2019. Recent advances in hormonal regulation

- and cross-talk during non-climacteric fruit development and ripening. *Horticulturae* 5.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae5020045>
- Fügel, R., Carle, R., Schieber, A., 2005. Quality and authenticity control of fruit purées, fruit preparations and jams - A review. *Trends Food Sci. Technol.* 16, 433–441.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.07.001>
- Gaidhani, K., Harwalkar, M., Bhambere, D., Nirgude, P., 2015. Lyophilization/Freeze drying - Review. *World J. Pharm. Res.* 13, 15.
- Gawkowska, D., Cybulska, J., Zdunek, A., 2018. Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers (Basel)*. 10.
<https://doi.org/10.3390/polym10070762>
- Gentile, Carla, Gregorio, E. Di, Stefano, V. Di, Mannino, G., Perrone, A., Avellone, G., Sortino, Giuseppe, Inglese, P., Farina, V., Gentile, C, Gregorio, D., Stefano, D., Mannino, V., Sortino, G, 2018. Food quality and nutraceutical value of nine cultivars of mango (*Mangifera indica* L.) fruits grown in Mediterranean subtropical environment. *Food Chem.* 277, 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.109>
- Gepts, P., 2014. Domestication of Plants. *Encycl. Agric. Food Syst.* 474–486.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00231-X>
- Gill, P.P.S., Jawandha, S.K., Kaur, N., Singh, N., 2017. Physico-chemical changes during progressive ripening of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Dashehari under different temperature regimes. *J. Food Sci. Technol.* 54, 1964–1970.
<https://doi.org/10.1007/s13197-017-2632-6>
- Gowen, A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., Oliveira, J., 2006. Optimisation of dehydration and rehydration properties of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) undergoing microwave-hot air combination drying. *Trends Food Sci. Technol.* 17, 177–183.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.11.013>
- Groher, T., Schmittgen, S., Fiebig, A., Noga, G., Hunsche, M., 2018. Suitability of fluorescence indices for the estimation of fruit maturity compounds in tomato fruits. *J. Sci. Food Agric.* 98, 5656–5665. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9111>
- Gundurao, A., Ramaswamy, H.S., Ahmed, J., 2011. Effect of soluble solids concentration and temperature on thermo-physical and rheological properties of mango puree. *Int. J. Food*

- Prop. 14, 1018–1036. <https://doi.org/10.1080/10942910903580876>
- Hammas, A., Lecomte-Nana, G., Azril, N., Daou, I., Peyratout, C., Zibouche, F., 2019. Kaolinite-magnesite based ceramics. Part I: Surface charge and rheological properties optimization of the suspensions for the processing of cordieritemullite tapes. *Minerals* 9. <https://doi.org/10.3390/min9120757>
- Hoffmann, A.M., Noga, G., Hunsche, M., 2015. Fluorescence indices for monitoring the ripening of tomatoes in pre- and postharvest phases. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 191, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.05.001>
- Hor, S., Léchaudel, M., Mith, H., Bugaud, C., 2020. Fruit density: A reliable indicator of sensory quality for mango. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 272, 109548. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109548>
- Huang, B., Zhao, K., Zhang, Z., Liu, F., Hu, H., Pan, S., 2018. LWT - Food Science and Technology Changes on the rheological properties of pectin-enriched mango nectar by high intensity ultrasound. *LWT - Food Sci. Technol.* 91, 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.062>
- Hultin, H.O., Levine, A.S., 1965. Pectin Methyl Esterase in the Ripening Banana. *J. Food Sci.* 30, 917–921. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1965.tb01865.x>
- Huybrechts, C.J.G., Deckers, T., Valcke, R., 2003. Predicting fruit quality and maturity of apples by fluorescence imaging: Effect of ethylene and AVG. *Acta Hortic.* 599, 243–247. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.599.28>
- Iagher, F., Reicher, F., Ganter, J.L.M.S., 2002. Structural and rheological properties of polysaccharides from mango (*Mangifera indica* L.) pulp. *Int. J. Biol. Macromol.* 31, 9–17. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(02\)00044-2](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(02)00044-2)
- Iguedjtal, T., Louka, N., Allaf, K., 2007. Sorption isotherms of Granny Smith apples hot-air dried and texturized by “controlled sudden decompression to the vacuum.” *Int. J. Food Eng.* 3. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1151>
- Jarimopas, B., Kitthawee, U., 2007. Firmness properties of mangoes. *Int. J. Food Prop.* 10, 899–909. <https://doi.org/10.1080/10942910701221731>
- Jarvis, M.C., Briggs, S.P.H., Knox, J.P., 2003. Intercellular adhesion and cell separation in plants. *Plant, Cell Environ.* 26, 977–989. <https://doi.org/10.1046/j.1365->

3040.2003.01034.x

Jha, S.N., Chopra, S., Kingsly, A.R.P., 2007. Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango. *J. Food Eng.* 78, 22–26.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.048>

Jha, S.N., Gunasekaran, S., 2010. Authentication of sweetness of mango juice using Fourier transform infrared-attenuated total reflection spectroscopy. *J. Food Eng.* 101, 337–342.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.07.019>

Jha, S.N., Jaiswal, P., Narsaiah, K., Gupta, M., Bhardwaj, R., Singh, A.K., 2012. Non-destructive prediction of sweetness of intact mango using near infrared spectroscopy. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 138, 171–175. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.031>

Jha, S.N., Narsaiah, K., Jaiswal, P., Bhardwaj, R., Gupta, M., Kumar, R., Sharma, R., 2014. Nondestructive prediction of maturity of mango using near infrared spectroscopy. *J. Food Eng.* 124, 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.012>

Joas, J., Caro, Y., Lechaudel, M., 2009. Postharvest Biology and Technology Comparison of postharvest changes in mango (cv Cogshall) using a Ripening class index (Rci) for different carbon supplies and harvest dates 54, 25–31.

<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.04.008>

Kasse, M., 2015. Amélioration de la conservation des mangues 4 ème gamme par l ' utilisation d ' un enrobage , d ' un traitement antimicrobien et du conditionnement sous atmosphère modifiée.

Kaur, M., Singh, N., Sodhi, N.S., 2005. Physicochemical, cooking, textural and roasting characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *J. Food Eng.* 69, 511–517.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.09.002>

Kim, K.B., Jung, H.M., Kim, M.S., Kim, G.S., 2004. Evaluation of fruit firmness by ultrasonic measurement. *Key Eng. Mater.* 270–273, 1049–1054.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.270-273.1049>

Kolb, C.A., Wirth, E., Kaiser, W.M., Meister, A., Riederer, M., Pfündel, E.E., 2006.

Noninvasive evaluation of the degree of ripeness in grape berries (*Vitis Vinifera* L Cv. Bacchus and Silvaner) by chlorophyll fluorescence. *J. Agric. Food Chem.* 54, 299–305.

<https://doi.org/10.1021/jf052128b>

- Kumar, R., Bawa, A.S., Manjunatha, S.S., Kathiravan, T., Nadasabapathi, S., 2015. Effect of pulsed electric field and pasteurisation treatments on the rheological properties of mango nectar (*Mangifera indica*). *Croat. J. Food Sci. Technol.* 7, 22–33.
<https://doi.org/10.17508/cjfst.2015.7.1.02>
- Labaky, P., Dahdouh, L., Ricci, J., Wisniewski, C., Pallet, D., Louka, N., Grosmaire, L., 2021. Impact of ripening on the physical properties of mango purees and application of simultaneous rheometry and in situ FTIR spectroscopy for rapid identification of biochemical and rheological changes. *J. Food Eng.* 300, 110507.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110507>
- Labaky, P., Grosmaire, L., Ricci, J., Wisniewski, C., Louka, N., Dahdouh, L., 2020. Innovative non-destructive sorting technique for juicy stone fruits: textural properties of fresh mangos and purees. *Food Bioprod. Process.* 123, 188–198.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.013>
- Lafforgue, O., Seyssieq, I., Poncet, S., Favier, J., 2018. Rheological properties of synthetic mucus for airway clearance. *J. Biomed. Mater. Res.* 106, 386–396.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.36251>
- Lan, W., Jaillais, B., Leca, A., Renard, C.M.G.C., Bureau, S., 2020a. A new application of NIR spectroscopy to describe and predict purees quality from the non-destructive apple measurements. *Food Chem.* 310, 125944.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125944>
- Lan, W., Jaillais, B., Leca, A., Renard, C.M.G.C., Bureau, S., 2020b. A new application of NIR spectroscopy to describe and predict purees quality from the non-destructive apple measurements. *Food Chem.* 310, 125944.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125944>
- Lan, W., Renard, C.M.G.C., Jaillais, B., Leca, A., Bureau, S., 2020c. Fresh, freeze-dried or cell wall samples: Which is the most appropriate to determine chemical, structural and rheological variations during apple processing using ATR-FTIR spectroscopy? *Food Chem.* 330, 127357. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127357>
- Lara-Espinoza, C., Carvajal-Millán, E., Balandrán-Quintana, R., López-Franco, Y., Rascón-Chu, A., 2018. Pectin and pectin-based composite materials: Beyond food texture.

- Molecules 23. <https://doi.org/10.3390/molecules23040942>
- Lawson, T., Lycett, G.W., Ali, A., Chin, C.F., 2019. Characterization of Southeast Asia mangoes (*Mangifera indica* L) according to their physicochemical attributes. *Sci. Hortic.* (Amsterdam). 243, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.014>
- Lazou, A., Krokida, M., 2010. Structural and textural characterization of corn-lentil extruded snacks. *J. Food Eng.* 100, 392–408. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.024>
- Léchaudel M., 2004. Croissance et qualité organoleptique de la mangue (*Mangifera indica*): analyse expérimentale et modélisation de l'effet de la disponibilité hydrique et carbonée 145.
- Léchaudel, M., Damour, G., Urban, L., Joas, J., 2013. Chlorophyll fluorescence as an indicator of when to harvest mango “Cogshall” fruit according to the market (export or domestic). *Acta Hortic.* 992, 159–166. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2013.992.19>
- Léchaudel, M., Joas, J., 2007. An overview of preharvest factors influencing mango fruit growth, quality and postharvest behaviour. *Brazilian J. Plant Physiol.* 19, 287–298. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400004>
- Lechaudel, M., Urban, L., Joas, J., 2010. Chlorophyll fluorescence, a nondestructive method to assess maturity of mango fruits (Cv. 'cogshall') without growth conditions bias. *J. Agric. Food Chem.* 58, 7532–7538. <https://doi.org/10.1021/jf101216t>
- Lee, M.-R., 2018. Erratum to: Objective Measurements of Textural and Rheological Properties of Cheese. *J. Milk Sci. Biotechnol.* 36, 186–186. <https://doi.org/10.22424/jmsb.2018.36.3.186>
- Leverrier, C., 2016. Relations Structure / Propriétés de Suspensions de Particules Végétales.
- Leverrier, C., Almeida, G., Espinosa-Muñoz, L., Cuvelier, G., 2016. Influence of Particle Size and Concentration on Rheological Behaviour of Reconstituted Apple Purees. *Food Biophys.* 11, 235–247. <https://doi.org/10.1007/s11483-016-9434-7>
- Li, X., Bi, J., Chen, Q., Jin, X., Wu, X., Zhou, M., 2019. Texture improvement and deformation inhibition of hot air-dried apple cubes via osmotic pretreatment coupled with instant control pressure drop (DIC). *Lwt* 101, 351–359. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.035>
- Li, Xiao, Bi, J., Jin, X., Lyu, J., Wu, X., Li, B., Li, Xuan, 2021. Study on the mechanism of

- volume expansion and texture formation of apple cube dried by instant controlled pressure drop drying (DIC). *J. Food Eng.* 293, 110379.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110379>
- Link, J.V., Tribuzi, G., Laurindo, J.B., 2017. Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. *LWT - Food Sci. Technol.* 84, 717–725. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.045>
- Liu, F.X., Fu, S.F., Bi, X.F., Chen, F., Liao, X.J., Hu, X.S., Wu, J.H., 2013. Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China. *Food Chem.* 138, 396–405. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.111>
- Lo'ay, A.A., Harbinson, J., Van Kooten, O., 2005. General introduction : Mangoes. Wageningen Agric. Univ. Pap.
- Lopez-Sanchez, P., Chapara, V., Schumm, S., Farr, R., 2012. Shear Elastic Deformation and Particle Packing in Plant Cell Dispersions. *Food Biophys.* 7, 1–14.
<https://doi.org/10.1007/s11483-011-9237-9>
- Lopez-Sanchez, P., Farr, R., 2012. Power Laws in the Elasticity and Yielding of Plant Particle Suspensions. *Food Biophys.* 7, 15–27. <https://doi.org/10.1007/s11483-011-9238-8>
- Lopez-Sanchez, P., Nijse, J., Blonk, H.C.G., Bialek, L., Schumm, S., Langton, M., 2011. Effect of mechanical and thermal treatments on the microstructure and rheological properties of carrot, broccoli and tomato dispersions. *J. Sci. Food Agric.* 91, 207–217.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.4168>
- Lou, H., Hu, Y., Zhang, L., Sun, P., Lu, H., 2012. Nondestructive evaluation of the changes of total flavonoid, total phenols, ABTS and DPPH radical scavenging activities, and sugars during mulberry (*Morus alba* L.) fruits development by chlorophyll fluorescence and RGB intensity values. *LWT - Food Sci. Technol.* 47, 19–24.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.008>
- Louka, N., 2006. Etude de l'effet de la texturation par autovaporisation sur la qualité générale et sur la relation eau-matière des produits biologiques séchés. Université de La Rochelle - Pôle Sciences et Technologie.
- Louka, N., 1996. Maîtrise de la Qualité des Produits Agro-Alimentaires Séchés ; Modification Texturale et Réduction du Coût Énergétique par Détente Instantanée Contrôlée “DIC”

vers le vide. Conception et Réalisation d'un Nouveau Procédé Industriel.

- Louka, N., Allaf, K., 2004. Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process "Controlled Sudden Decompression to the vacuum": Application to potatoes, carrots and onions. *J. Food Eng.* 65, 233–243.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.020>
- Louka, N., Allaf, K., 2002. New process for texturizing partially dehydrated biological products using controlled sudden decompression to the vacuum: Application on potatoes. *J. Food Sci.* 67, 3033–3038. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08855.x>
- Louka, N., Juhel, F., Allaf, K., 2004. Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression general patterns for the variation of the expansion ratio. *J. Food Eng.* 65, 245–253.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.021>
- Ma, X., Wu, H., Liu, L., Yao, Q., Wang, S., Zhan, R., Xing, S., Zhou, Y., 2011. Polyphenolic compounds and antioxidant properties in mango fruits. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 129, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.015>
- Machiels, D., Istasse, L., 2002. La réaction de Maillard: Importance et applications en chimie des aliments. *Ann. Med. Vet.* 146, 347–352.
- Magwaza, L.S., Tesfay, S.Z., 2015. A Review of Destructive and Non-destructive Methods for Determining Avocado Fruit Maturity. *Food Bioprocess Technol.* 8, 1995–2011.
<https://doi.org/10.1007/s11947-015-1568-y>
- Makroo, H.A., Prabhakar, P.K., Rastogi, N.K., Srivastava, B., 2019. Characterization of mango puree based on total soluble solids and acid content: Effect on physico-chemical, rheological, thermal and ohmic heating behaviour. *LWT - Food Sci. Technol.*
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.003>
- Maldonado-Celis, M.E., Yahia, E.M., Bedoya, R., Landázuri, P., Loango, N., Aguillón, J., Restrepo, B., Guerrero Ospina, J.C., 2019. Chemical Composition of Mango (*Mangifera indica* L.) Fruit: Nutritional and Phytochemical Compounds. *Front. Plant Sci.* 10, 1–21.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01073>
- Maroun, R.G., Rajha, H.N., El Darra, N., El Kantar, S., Chacar, S., Debs, E., Vorobiev, E., Louka, N., 2018. Emerging technologies for the extraction of polyphenols from natural

- sources, Polyphenols: Properties, Recovery, and Applications. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813572-3.00008-7>
- Martin, M., He, Q., 2009. Mango bioactive compounds and related nutraceutical properties-A review. *Food Rev. Int.* 25, 346–370. <https://doi.org/10.1080/87559120903153524>
- Massa, A., González, C., Maestro, A., Labanda, J., Ibarz, A., 2010. Rheological characterization of peach purees. *J. Texture Stud.* 41, 532–548.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2010.00240.x>
- Masud Parvez, G., 2016. Pharmacological Activities of Mango (*Mangifera Indica*): A Review. *J. Pharmacogn. Phytochem. JPP* 1, 1–7.
- Matheyambath, A.C., Subramanian, J., Paliyath, G., 2015. Mangoes. *Encycl. Food Heal.* 641–645. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00442-6>
- Medlicott, A.P., Thompson, A.K., 1985. Analysis of sugars and organic acids in ripening mango fruits (*Mangifera indica* L. var Keitt) by high performance liquid chromatography. *J. Sci. Food Agric.* 36, 561–566. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740360707>
- Megías-Alguacil, D., 2004. Characterization of the Linear Viscoelastic Region in Suspensions of Zirconium Oxide: Cohesive Energy Obtained From the Critical Parameters. *Appl. Rheol.* 14, 126–132. <https://doi.org/10.1515/arh-2004-0007>
- Memon, A., Marri, M.Y.K., Khushk, A.M., 2013. Estimation of mango post harvest losses in sindh 2827–2832.
- Meng, X., Threinen, D., Hansen, M., Driedger, D., 2010. Effects of extrusion conditions on system parameters and physical properties of a chickpea flour-based snack. *Food Res. Int.* 43, 650–658. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.07.016>
- Moelants, Katlijn R N, Cardinaels, R., Buggenhout, S. Van, Loey, A.M. Van, Moldenaers, P., Hendrickx, M.E., 2014. A Review on the Relationships between Processing , Food Structure , and Rheological Properties of Plant-Tissue-Based Food Suspensions 13, 241–260. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12059>
- Moelants, Katlijn R.N., Cardinaels, R., Jolie, R.P., Verrijssen, T.A.J., Van Buggenhout, S., Van Loey, A.M., Moldenaers, P., Hendrickx, M.E., 2014. Rheology of Concentrated Tomato-Derived Suspensions: Effects of Particle Characteristics. *Food Bioprocess Technol.* 7, 248–264. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1070-3>

- Monteyne, T., Heeze, L., Oldörp, K., Vervae, C., Remon, J.P., De Beer, T., 2016. Vibrational spectroscopy to support the link between rheology and continuous twin-screw melt granulation on molecular level: A case study. *Eur. J. Pharm. Biopharm.* 103, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.03.030>
- Mousavi, S.M.R., Rafe, A., Yeganehzad, S., 2020. Structure-rheology relationships of composite gels: Alginate and Basil seed gum/guar gum. *Carbohydr. Polym.* 232, 115809. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115809>
- Mrad, R., Assy, P., Maroun, R.G., Louka, N., 2015. Multiple optimization of polyphenols content, texture and color of roasted chickpea pre-treated by IVDV using response surface methodology. *Lwt* 62, 532–540. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.013>
- Mrad, R., Debs, E., Maroun, R.G., Louka, N., 2014a. Multiple optimization of chemical components and texture of purple maize expanded by IVDV treatment using the response surface methodology. *Food Chem.* 165, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.087>
- Mrad, R., Debs, E., Saliba, R., Maroun, R.G., Louka, N., 2014b. Multiple optimization of chemical and textural properties of roasted expanded purple maize using response surface methodology. *J. Cereal Sci.* 60, 397–405. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.05.005>
- Mrad, R., Roupheal, M., Maroun, R.G., Louka, N., 2014c. Effect of expansion by “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV) on polyphenol content, expansion ratio, texture and color changes of Australian chickpea. *LWT - Food Sci. Technol.* 59, 874–882. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.026>
- Murchie, E.H., Lawson, T., 2013. Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications. *J. Exp. Bot.* 64, 3983–3998. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert208>
- N’Guettia, Y.M., 2015. Anthracnose de la mangue (*Mangifera indica* L.) en Côte d’Ivoire: Caractérisation de l’agent pathogène et efficacité in vitro et in vivo de deux fongicides chimiques 171.
- Nader, J., Afif, C., Louka, N., 2017. Expansion of partially defatted peanuts by a new texturizing process called “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV). *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 41, 179–187.

<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.03.005>

- Nader, J., Afif, C., Louka, N., 2016a. Color and texture of low-calorie peanuts as affected by a new oil extraction process named “Mechanical Expression Preserving Shape Integrity” (MEPSI). *J. Food Sci. Technol.* 53, 1649–1662. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2081-z>
- Nader, J., Afif, C., Louka, N., 2016b. Study of physiological and textural properties of roasted peanuts defatted by an innovative oil extraction process. Correlation with consumer evaluation. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 33, 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.12.007>
- Nader, J., Fawaz, N., Afif, C., Louka, N., 2016c. A novel process for preparing low-fat peanuts: Optimization of the oil extraction yield with limited structural and organoleptic damage. *Food Chem.* 197, 1215–1225. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.079>
- Nader, J., Louka, N., 2018. Development of a novel technology entitled “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV) for reconstitution and texturing of partially defatted peanuts. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 45, 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.015>
- Nambi, V.E., Thangavel, K., Rajeswari, K.A., Manickavasagan, A., Geetha, V., 2016. Texture and rheological changes of Indian mango cultivars during ripening. *Postharvest Biol. Technol.* 117, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.02.009>
- Nicolaï, B.M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I., Lammertyn, J., 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biol. Technol.* 46, 99–118. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.024>
- Nindo, C.I., Tang, J., Powers, J.R., Takhar, P.S., 2007. Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *LWT - Food Sci. Technol.* 40, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.10.003>
- Nordey, T., 2014. Analyse expérimentale et modélisation de l’hétérogénéité de la qualité et de la maturité des mangues.
- Nordey, T., Davrieux, F., Léchaudel, M., 2019. Predictions of fruit shelf life and quality after ripening: Are quality traits measured at harvest reliable indicators? *Postharvest Biol.*

- Technol. 153, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.03.011>
- Nordey, T., Joas, J., Davrieux, F., Chillet, M., Léchaudel, M., 2017. Robust NIRS models for non-destructive prediction of mango internal quality. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 216, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.12.023>
- Okino-Delgado, C.H., Prado, D.Z., Pereira, M.S., Camargo, D.A., Koike, M.A., Fleuri, L.F., 2020. *Mango, Valorization of Fruit Processing By-products*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817106-6.00008-3>
- Olale, K., Walyambillah, W., Mohammed, S.A., Sila, A., Shepherd, K., 2017. Application of DRIFT-FTIR spectroscopy for quantitative prediction of simple sugars in two local and two Floridian mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in Kenya. *J. Anal. Sci. Technol.* 8. <https://doi.org/10.1186/s40543-017-0130-0>
- Ortiz-Viedma, J., Rodriguez, A., Vega, C., Osorio, F., Defillipi, B., Ferreira, R., Saavedra, J., 2018. Textural, flow and viscoelastic properties of Hass avocado (*Persea americana* Mill.) during ripening under refrigeration conditions. *J. Food Eng.* 219, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.09.014>
- Padda, M.S., do Amarante, C.V.T., Garcia, R.M., Slaughter, D.C., Mitcham, E.J., 2011. Methods to analyze physico-chemical changes during mango ripening: A multivariate approach. *Postharvest Biol. Technol.* 62, 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.06.002>
- Palafox-Carlos, H., Yahia, E., Islas-Osuna, M.A., Gutierrez-Martinez, P., Robles-Sánchez, M., González-Aguilar, G.A., 2012. Effect of ripeness stage of mango fruit (*Mangifera indica* L., cv. Ataulfo) on physiological parameters and antioxidant activity. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 135, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.11.027>
- Pathak, S., Sriramulu, S., Thandavan, S.P., Jothimani, G., Banerjee, A., 2018. Enhancement of Shelf Life of the Climacteric Fruits : A Review on Application of CRISPRi Technology 1.
- Paull, R.E., Duarte, O., 2011. *Tropical Fruits, 2nd Edition Volume 1, Crop production science in horticulture series*.
- Payasi, A., Sanwal, G.G., 2010. Ripening of climacteric fruits and their control. *J. Food Biochem.* 34, 679–710. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2009.00307.x>
- Pelegrine, D.H., Silva, F.C., Gasparetto, C.A., 2002. Rheological behavior of pineapple and

- mango pulps. *LWT - Food Sci. Technol.* 35, 645–648.
<https://doi.org/10.1006/fstl.2002.0920>
- Penchaiya, P., Uthairatanakij, A., Srilaong, V., Kanlayanarat, S., Tijskens, L.M.M., Tansakul, A., 2015. Measurement of mango firmness by non-destructive limited compression technique. *Acta Hort.* 1088, 73–78. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1088.7>
- Phaokuntha, S., Poonlarp, P.B., Pongsirikul, I., 2014. Rheological properties of mango puree and process development of mango sheet. *Acta Hort.* 1024, 373–380.
- Prasanna, V., Yashoda, H.M., Prabha, T.N., Tharanathan, R.N., 2003. Pectic polysaccharides during ripening of mango (*Mangifera indica* L.). *J. Sci. Food Agric.* 83, 1182–1186.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.1522>
- Pronprasit, R., Natwichai, J., 2013. Prediction of Mango Fruit Quality from NIR Spectroscopy using an Ensemble Classification. *Int. J. Comput. Appl.* 83, 25–30.
<https://doi.org/10.5120/14517-2903>
- Ratti, C., 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *J. Food Eng.* 49, 311–319. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00228-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00228-4)
- Reddy, L.V., Reddy, O.V.S., 2007. Production of ethanol from mango (*Mangifera indica* L.) fruit juice fermentation. *Res. J. Microbiol.* 2, 763–769.
<https://doi.org/10.3923/jm.2007.763.769>
- Reddy, L.V.A., Reddy, O.V.S., Joshi, V.K., 2014. Production of Wine from Mango Fruit: A Review. *Int. J. Food Ferment. Technol.* 4, 13. <https://doi.org/10.5958/2277-9396.2014.00002.6>
- Rey, J.Y., Diallo, T.M., Vannière, H., Didier, C., Kéita, S., Sangaréc, M., 2004. La mangue en Afrique de l'Ouest francophone. *Fruits* 59, 121–129.
<https://doi.org/10.1051/fruits:2004012>
- Ricci, J., Delalande, M., Wisniewski, C., Dahdouh, L., 2021. Role of dispersing and dispersed phases in the viscoelastic properties and the flow behavior of fruit juices during concentration operation: Case of orange juice. *Food Bioprod. Process.* 126, 121–129.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.11.013>
- Rivier, M., Méot, J.-M., Ferré, T., Briard, M., 2009. Le séchage des mangues, Le séchage des mangues. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-0342-0>

- Rumainum, I.M., Worarad, K., Srilaong, V., Yamane, K., 2018. Fruit quality and antioxidant capacity of six Thai mango cultivars. *Agric. Nat. Resour.* 52, 208–214.
<https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.06.007>
- Sab, M., Ashok, M.B., Sudhakara, S.N., 2017. Estimation of Post-Harvest Losses of Mangoes at Different Stages from Harvesting to Consumption. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 6, 310–318. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.612.037>
- Sagar, V.R., Suresh Kumar, P., 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. *J. Food Sci. Technol.* 47, 15–26. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0010-8>
- Sánchez-gimeno, A.N.A.C., 2009. White guava fruit and purees : textural and rheological properties and effect on the temperature 40, 334–345.
- Schmilovitch, Z., Mizrach, A., Hoffman, A., Egozi, H., Fuchs, Y., 2000. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry. *Postharvest Biol. Technol.* 19, 245–252. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00102-2)
- Ścibisz, I., Reich, M., Bureau, S., Gouble, B., Causse, M., Bertrand, D., Renard, C.M.G.C., 2011. Mid-infrared spectroscopy as a tool for rapid determination of internal quality parameters in tomato. *Food Chem.* 125, 1390–1397.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.10.012>
- Shah, K., Patel, M., Patel, R., Parmar, P., 2010. *Mangifera Indica* (Mango). *Pharmacogn. Rev.* 4, 42–48. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.65325>
- Shah, N., Cynkar, W., Smith, P., Cozzolino, D., 2010. Use of attenuated total reflectance midinfrared for rapid and real-time analysis of compositional parameters in commercial white grape juice. *J. Agric. Food Chem.* 58, 3279–3283. <https://doi.org/10.1021/jf100420z>
- Siddiq, M., Sogi, D.S., Roidoung, S., 2017. Handbook of Mango Fruit. *Handb. Mango Fruit.*
<https://doi.org/10.1002/9781119014362>
- Slaughter, D., 2009. Nondestructive Maturity Assessment Methods for Mango: A Review of Literature and Identification of Future Research Needs. *Univ. California, Davis* 1–18.
- Sulaiman, I., 2014. Approches fondamentales et expérimentales des processus d' autovaporisation et de modification structurale de matériaux surchauffés pendant la détente instantanée contrôlée vers le vide Ismail Sulaiman To cite this version : HAL Id :

Étude de nouveaux marqueurs de qualité de la mangue fraîche et d'un procédé innovant de texturation (IVDV) pour l'optimisation de la qualité des purées et des mangues séchées

tel-01066134 Pour o.

- Suntudprom, J., East, A.R., Bronlund, J.E., Je, S., 2011. Influence of Fruit Maturity on Texture and Colour of Puree Products.
- T., H., Jr., C., n.d. MANGO PROCESSING AND PRODUCTS. USDA - Agric. Res. Serv.
- Tandon, D.K., Kalra, S.K., 1983. Changes in sugars, starch and amylase activity during development of mango fruit cv Dashehari. *J. Hortic. Sci.* 58, 449–453.
<https://doi.org/10.1080/00221589.1983.11515142>
- Tharanathan, R.N., Yashoda, H.M., Prabha, T.N., 2006. Mango (*Mangifera indica* L.), “the king of fruits” - An overview, *Food Reviews International*.
<https://doi.org/10.1080/87559120600574493>
- Thu Ha Nguyen, 2016. Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux 243.
- Ueda, M., Sasaki, K., Utsunomiya, N., Shimabayashi, Y., 2001. Changes in Properties during Maturation and Ripening of “Chiin Hwang No. 1” Mango Fruit Cultivated in a Plastic Greenhouse. *Food Sci. Technol. Res.* 7, 207–213. <https://doi.org/10.3136/fstr.7.207>
- Ullah, R., Khan, S., Bilal, M., Nurjis, F., Saleem, M., 2016. Non-invasive assessment of mango ripening using fluorescence spectroscopy. *Optik (Stuttg)*. 127, 5186–5189.
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.03.049>
- United Nations, U., 2016. Mango, UNICTAD.
- Urbano Bron, I., Vasconcelos Ribeiro, R., Azzolini, M., Pedro Jacomino, A., Caruso MacHado, E., 2004. Chlorophyll fluorescence as a tool to evaluate the ripening of “Golden” papaya fruit. *Postharvest Biol. Technol.* 33, 163–173.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.02.004>
- USDA, 2015. National Nutrient Database for Standard Reference, Release 28 (2015) Documentation and User Guide 28.
- Valente, M., Dornier, M., Piombo, G., Grotte, M., Valente, M., Dornier, M., Piombo, G., Grotte, M., Alentea, M. V., Ornierb, M.D., Iomboa, G.P., Rottec, M.G., 2019. Mango fruit firmness and pulp starch content . To cite this version : HAL Id : hal-02046633 Article original Relation entre la fermeté de la mangue fraîche et la teneur en amidon de la pulpe 59, 399–410. <https://doi.org/10.1051/fruits>

- Valente, M., Prades, A., Laux, D., 2013. Potential use of physical measurements including ultrasound for a better mango fruit quality characterization. *J. Food Eng.* 116, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.022>
- Valente, M., Ribeyre, F., Self, G., Berthiot, L., Assemat, S., 2011. Instrumental and sensory characterization of mango fruit texture. *J. Food Qual.* 34, 413–424. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2011.00412.x>
- Valero, C., Crisosto, C.H., Slaughter, D., 2007. Relationship between nondestructive firmness measurements and commercially important ripening fruit stages for peaches, nectarines and plums. *Postharvest Biol. Technol.* 44, 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.12.014>
- Van Melle, C., Buschmann, S., 2013. Analyse comparative des chaînes de valeur de la mangue au Bénin, au Ghana et au Burkina Faso. *Reconstruire le potentiel Aliment. l’Afrique l’Ouest*, A. Elbehri (ed.), FAO/FIDA. 341–371. <https://doi.org/10.2307/j.ctv69stjq.17>
- Vannière, H., Didier, C., Rey, J.Y., Diallo, T.M., Kéita, S., Sangaré, M., 2004. La mangue en Afrique de l’ouest francophone : Les systèmes de production et les itinéraires techniques. *Fruits* 59, 383–398. <https://doi.org/10.1051/fruits:2005001>
- Varakumar, S., Naresh, K., Reddy, O.V.S., 2012. Preparation of mango (*Mangifera indica* L.) wine using a new yeast-mango-peel immobilised biocatalyst system. *Czech J. Food Sci.* 30, 557–566.
- Vardin, H., Tay, A., Ozen, B., Mauer, L., 2008. Authentication of pomegranate juice concentrate using FTIR spectroscopy and chemometrics. *Food Chem.* 108, 742–748. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.027>
- Venkatesan, T., Tamilmani, C., 2013. Effect of Ethrel on the Starch Sugar Changes of Off-Season Fruits of Mango (*Mangifera indica* L. Var. Neelum) during Ripening. *Int. Lett. Nat. Sci.* 7, 1–12. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/ilns.7.1>
- Waldron, K.W., Parker, M.L., Smith, A.C., 2003. and Food Quality. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2, 101–119.
- Wen, L., Wrolstad, R.E., 2002. Phenolic Composition of Authentic Pineapple Juice. *J. Food Sci.* 67, 155–161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11376.x>
- Wisniewski, R., 2015. Spray Drying Technology Review. *Int. Conf. Environ. Syst.* 1–9.

- Xu, F., Hu, H., Liu, Q., Dai, X., Zhang, H., 2017. Rheological and microstructural properties of wheat flour dough systems added with potato granules. *Int. J. Food Prop.* 20, S1145–S1157. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1337791>
- Xu, Z., Wang, Y., Ren, P., Ni, Y., Liao, X., 2016. Quality of Banana Puree During Storage: a Comparison of High Pressure Processing and Thermal Pasteurization Methods. *Food Bioprocess Technol.* 9, 407–420. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1635-4>
- Yahia, E.M., 2011. Mango (*Mangifera indica* L.), Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits: Cocona to Mango. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857092885.492>
- Yashoda, H.M., Prabha, T.N., Tharanathan, R.N., 2007. Mango ripening - Role of carbohydrases in tissue softening. *Food Chem.* 102, 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.001>
- Yashoda, H.M., Prabha, T.N., Tharanathan, R.N., 2006. Mango ripening: Changes in cell wall constituents in relation to textural softening. *J. Sci. Food Agric.* 86, 713–721. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2404>
- Yi, J.Y., Lyu, J., Bi, J.F., Zhou, L.Y., Zhou, M., 2017. Hot air drying and freeze drying pre-treatments coupled to explosion puffing drying in terms of quality attributes of mango, pitaya, and papaya fruit chips. *J. Food Process. Preserv.* 41, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13300>
- Zakaria, A., Md Shakaff, A.Y., Masnan, M.J., Saad, F.S.A., Adom, A.H., Ahmad, M.N., Jaafar, M.N., Abdullah, A.H., Kamarudin, L.M., 2012. Improved maturity and ripeness classifications of *Mangifera Indica* cv. harumanis mangoes through sensor fusion of an electronic nose and acoustic sensor. *Sensors (Switzerland)* 12, 6023–6048. <https://doi.org/10.3390/s120506023>
- Zeaiter, A., 2019. Intensification par détente instantanée contrôlée (DIC) de la fonctionnalisation physico-chimiques [sic] des graines végétales (caroube et tournesol) Amal Zeaiter To cite this version : HAL Id : tel-02009832.
- Zhao, R., Gao, T., 2016. Research Progress of Hot Air Drying Technology for Fruits and Vegetables. *Adv. J. Food Sci. Technol.* 10, 160–166. <https://doi.org/10.19026/ajfst.10.2045>

Zude, M., Herold, B., Roger, J.M., Bellon-Maurel, V., Landahl, S., 2006. Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. *J. Food Eng.* 77, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.027>