



Impact du pré-récolte, du post-récolte et des conditions de séchage sur la qualité des mangues sèches naturelles

Alioune Diop

► To cite this version:

Alioune Diop. Impact du pré-récolte, du post-récolte et des conditions de séchage sur la qualité des mangues sèches naturelles. Agronomie. Université de la Réunion, 2021. Français. NNT : 2021LARE0034 . tel-04042141

HAL Id: tel-04042141

<https://theses.hal.science/tel-04042141>

Submitted on 23 Mar 2023

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

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



**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES, TECHNOLOGIES ET SANTÉ
CIRAD – UNITÉ MIXTE DE RECHERCHE QUALISUD
INSTITUT DE TECHNOLOGIE ALIMENTAIRE DE DAKAR**

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Université de la Réunion
Mention : Génie des Procédés

Alioune DIOP

**Impact du pré-récolte, du post-récolte et des conditions de
séchage sur la qualité des mangues sèches naturelles**

Sous la direction de Marc CHILLET

Soutenance prévue le 13 décembre 2021

Jury :

Nicolas LOUKA	Professeur, Université Saint-Joseph de Beyrouth	Rapporteur
Christophe VIAL	Professeur, Université Clermont Auvergne – Inst. Pascal	Rapporteur
Hélène DESMORIEUX	Maître de Conférences, Université C. Bernard - Lyon 1	Examinatrice
Joseph BASSAMA	Maître de Conférences, Université Gaston Berger	Examineur
Cyrielle GARCIA	Maître de Conférences, Université de la Réunion	Examinatrice
Marc CHILLET	Directeur de Recherche, CIRAD – UMR QualiSud	Directeur de thèse
Jean-Michel MÉOT	Chercheur, CIRAD – UMR QualiSud	Encadrant
Mathieu LÉCHAUDEL	Chercheur, CIRAD – UMR QualiSud	Encadrant

LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné **Alioune DIOP** en ma qualité de doctorant de l'Université de La Réunion, déclare être conscient que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à **Saint-Pierre**, le **10/11/2021**

Signature :

Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de tels droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.

Remerciements

Au terme de cette thèse, je te tiens à remercier particulièrement mon encadrant principal, **Jean-Michel Méot**, qui a constamment mobilisé toute son énergie, ses connaissances et ses compétences pour la bonne marche de ce travail. Merci aussi pour ses conseils et son aide dans mes orientations professionnelles. Je tiens aussi à saluer, sincèrement, sa bienveillance et son endurance pour me mettre dans les meilleures conditions. J'ai beaucoup appris de lui tant au niveau scientifique, relationnel, qu'humain.

Je remercie aussi profondément mon Directeur de thèse **Marc Chillet**, pour la confiance qu'il m'a accordée, ses conseils judicieux et son aide depuis la mise en place de la thèse. Merci aussi pour les démarches et les conditions pratiques lors de mes séjours à la Réunion.

Un grand merci à mon co-encadrant, **Mathieu Léchaudel**. Son recul, son expérience, sa pluridisciplinarité et ses conseils précieux ont été incontournables à la bonne marche de la thèse. Je le remercie pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa patience.

Je témoigne beaucoup de reconnaissance aux membres du jury **Nicolas Louka, Christophe Vial, Hélène Desmorieux, Joseph Bassama** et **Cyrielle Garcia** qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse.

Je tiens aussi à remercier les membres de mon comité de thèse : **Francis Courtois, Nafissatou Diop Ndiaye, Christian Mertz** pour leurs conseils avisés qui ont permis d'avoir une meilleure orientation scientifique à l'issue de chaque comité de thèse. Une mention à Nafissatou, qui m'a accueilli et encadré avec gentillesse et dans les meilleures conditions dans « l'Atelier Fruits et Légumes » de l'ITA. Merci beaucoup pour tous les conseils qu'elle m'a donnés, dans le cadre professionnel et humain. Merci aussi à Christian pour son implication lors des accueils à l'ITA et dans l'encadrement.

Je remercie mon autre Directeur de thèse **Mady Cissé** du côté de l'Université Cheikh Anta Diop ainsi que le Directeur de l'UMR QualiSud **Dominique Pallet** et le Directeur Général de l'Institut de Technologie Alimentaire de Dakar **Mamadou Amadou Seck** d'avoir accepté de m'accueillir dans leurs laboratoires respectifs. Merci aussi à **Hippolyte Kodja** pour les démarches entreprises au niveau de l'Université de la Réunion durant la thèse.

Mes profonds remerciements à **Frédéric Chiroleu** de m'avoir appris et accompagné avec sympathie, pédagogie et bonne humeur, depuis les bases jusqu'aux complexités de Rstudio. Merci aussi à **Anna**.

Je souhaite aussi remercier **Jérôme Minier, Mathilde Hoareau, Charlotte Delpech, Babacar Dieng, Noel Diandy, Murielle Sinatamby** et **Doralice Vaillant**, mais aussi les stagiaires **Vanessa Hoareau, Fatimezzahra Sallam, Estelle Parvedy** et **Lydia Kaci**. Votre implication sur le terrain, au labo et derrière l'ordinateur, a été très significatif dans la réussite de cette thèse. Merci beaucoup à **Ahmed Taïbi** et **Antoine Drouillard** pour nos énigmatiques récoltes de mangues sous tempête tropicale.

Mes remerciements à toute la 8^{ème} Compagnie de l'UMR QualiSud Réunion, je pense à **Bastien, Lorraine, Manon, Pascaline, Christian, Mathieu, Jean-Christophe, Loyal, Julien, Charlène, Guillaume, Joelle, Fabrice, Sophie, Cathérine, Marie et Franceline**. Je remercie aussi tous les autres collègues de la station Ligne-Paradis et Bassin-Plat en particulier **Frédéric Normand** pour m'avoir facilité l'accès aux vergers expérimentaux pour les récoltes de mangues. Il en est de même pour les collègues du Cirad Montpellier. Merci à **Jean-Paul Fleuriot** de m'avoir appris à bricoler et pour le séchoir construit dans le cadre de ma thèse, merci à **Patrice Thaunay** pour la gestion de ce projet, à **Paola**, à **Michel** ainsi qu'au reste de l'équipe.

Merci tous les collègues de l'ITA et tout particulièrement mon ami **Mor Dièye** d'avoir facilité mes séjours et mon intégration au sein de l'équipe.

Je tiens aussi à remercier les collègues de l'Esiroi, **Kaïes, Cyrielle, Joël Grillasca, Joël Couprie, Gwendoline, Fabiola, Matthieu**, ma voisine de bureau **Donna** et le Directeur **François Garde**.

Une très grande pensée à **Daba Mbacké**, à ma brave, belle et chère mère **Astou Mbacké**, à mes frères et sœurs **Serigne, Khadim, Diarra** (et **Serigne Modou**) et **Fatou**, à mon oncle **Serigne Bassirou Mbacké** ainsi qu'à mon ami **Youssou**. Vous m'avez toujours fait confiance, soutenu et aidé durant les dures épreuves de la vie et c'est aussi avec vous que j'ai passé les meilleurs moments. Je n'oublie pas tous mes autres amis (Ku limm juum) et je remercie le Très-Haut de m'avoir mis sur votre chemin.

Je termine ces remerciements en témoignant, toute ma profonde gratitude envers mon feu et très cher père **Modou Awa Balla Diop. Papa**, je te dédie cette thèse, ainsi que toutes mes réalisations futures. C'est bien grâce à toi, ton investissement corps et âme dans notre éducation que j'en suis arrivé là. Tes précieuses paroles seront toujours mon code de conduite.

Sommaire

Introduction	1
I. Contexte général	2
II. Synthèse bibliographique.....	5
III. Conclusions de la synthèse bibliographique et démarche de la thèse	24
IV. Plan du manuscrit	26
Première partie : Facteurs influençant la qualité des mangues sèches	27
Chapitre I. Impact of pre- and post-harvest on color changes during convective drying of mangoes	28
I. Introduction	29
II. Materials and methods	30
III. Results and discussion	32
IV. Conclusions	39
Chapitre II. Impact de diagramme de séchage spéciaux sur la stabilité de la couleur des mangues de maturités différentes	44
I. Abstract.....	45
II. Introduction.....	46
III. Matériels et méthodes	47
IV. Résultats et discussion	50
V. Conclusion	56
Partie II. Facteurs influençant la qualité des mangues fraîches	58
Chapitre I. Impact du pré-récolte et du post-récolte sur la qualité des mangues fraîches du Sénégal (cv. Kent) et de l'Île de la Réunion (cv. Cogshall).....	59
I. Abstract.....	60
II. Introduction.....	61
III. Matériels et méthodes	63
IV. Résultats.....	65
V. Discussion.....	72

VI. Conclusion	77
Chapitre II. Evolution de la qualité de mangues mûres lors du stockage à 12 °C	78
I. Abstract.....	79
II. Introduction.....	80
III. Matériels et méthodes	82
IV. Résultats.....	83
V. Conclusions et perspectives	88
Discussion générale	89
I. Les conditions de pré- et post-récolte n'ont pas d'influence sur les modifications de couleur des mangues lors d'un « bon » séchage	93
II. La variabilité induite par la maturité influence le comportement des mangues lors d'un séchage non optimal.....	96
III. Le pré- et le post-récolte sont les leviers d'amélioration de la qualité des mangues sèches naturelles et de la disponibilité en matières premières	98
IV. Limites et perspectives	101
Conclusion générale	104
Références bibliographiques	108
Annexes	121

Liste des figures

Figure 1 : Manguiers et mangues de stade vert-mature cv. Kent au Sénégal à droite et cv. Cogshall à la Réunion (sources : Rosalie (2015) ; A. Diop).	7
Figure 2 : Types de mangues sèches	7
Figure 3 : Evolution des 5-HMF en fonction de l' a_w après le traitement thermique (Korbel et al., 2013a).	14
Figure 4 : Distribution des composés aromatiques (en classe %) dans la mangue fraîche et séchée (Bonneau et al., 2016).	17
Figure 5 : Profil aromatique de 3 variétés de mangues (Bonneau. (2016); extrait de Pandit et al. (2009)).	19
Figure 6 : Evolution de la qualité de la mangue en fonction de son stade de maturité (Joas and Lechaudel, 2009).	21
Figure 7 : Box-plots du °Brix, de l'acidité titrable, du pH, du L* et du H° en fonction de la durée de maturation à 20 °C. Les lettres représentent les groupes homogènes à $p < 5\%$.	51
Figure 8 : Régressions Indices Colorimétriques mesurés sur des tranches séchées en fonction des mêmes Indices Colorimétriques mesurés sur les mêmes tranches avant séchage. Ligne pointillée grise : première bissectrice ; autres lignes pleines avec enveloppes grises : droites de régression, et intervalles de confiance à 95%. Lettres : Groupes homogènes de droites à $p < 0.05$.	53
Figure 9 : Régressions ΔL^* en fonction des indices physico-chimiques selon les séchages humide et chaud.	55
Figure 10 : Régressions ΔH° en fonction des indices physico-chimiques selon les séchages humide et chaud.	56
Figure 11 : Evolution des pertes de masse durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.	67
Figure 12 : Evolution du °Brix durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.	69
Figure 13 : Evolution de la luminance durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.	69

Figure 14 : Evolution de l'angle de teinte durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.	70
Figure 15 : Evolution du Chroma durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.....	71
Figure 16 : Evolution du nombre de jours de maturation en fonction des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %. Les différentes lettres par ligne (effet d'un facteur pré-récolte ou post-récolte), par couleur représentent les différences significatives ($p < 0.05$).....	72
Figure 17 : Test de compression issu de Labaky et al. (2020)	82
Figure 18 : Evolution des paramètres physico-chimiques et colorimétriques lors de la conservation à 20 °C suivie de la conservation à 12 °C.....	87
Figure 19 : Corrélation linéaire entre paramètres qualité mesurés sur la pulpe de mangues fraîches muries à 20 °C et conservées à 12 °C.....	88
Figure 20 : Acidités titrables, exprimées sur base sèche, mesurées sur des pulpes de mangues sèches en fonction de celles mesurées sur les mêmes pulpes avant séchage	92
Figure 21 : Cinétiques de perte en eau des tranches de pulpe de mangues fraîches lors du séchage en fonction du stade de maturité.....	93
Figure 22: Essais de traction d'éprouvettes h3 de mangue de différentes humidités.	102

Liste des tableaux :

Tableau 1: Effet de la position du fruit sur l'arbre sur la qualité de la mangue 'Kensington' (Léchaudel and Joas, 2007)	20
Tableau 2 : Effets du stress hydrique sur le nombre et la taille des cellules de mangue 'Kensington', l'épaisseur des cuticules et la masse du fruit à la récolte, et sur la qualité (Léchaudel and Joas, 2007)	21
Tableau 3 : Coefficients de corrélation des régressions Δ Indice colorimétrique standard – séchage étudié=f(Chimie) pour les indices L^* et H° , selon les séchages humide et chaud.	54
Tableau 4 : Impact du pré-récolte sur la masse, le °Brix et la couleur des mangues à la récolte	66
Tableau 5 : Effet du pré-récolte et post-récolte sur les pertes de masse, le °Brix et la durée de maturation.....	66
Tableau 6 : Effet du pré-récolte et post-récolte sur la couleur (L^* , H° et C^*) lors de la maturation	66

Introduction

I. Contexte général

Les fruits sont réputés être des aliments sains, essentiels pour une alimentation équilibrée. Il existe de plus en plus d'études cliniques et épidémiologiques montrant que l'inclusion des fruits et légumes dans l'alimentation favorise la lutte contre diverses maladies (Yahia, 2017). Les propriétés digestives des fibres et antioxydantes des molécules bioactives tels que les polyphénols, les caroténoïdes et les vitamines des fruits apportent une protection contre le diabète, les désordres gastro-intestinaux, les pathologies cardiovasculaires, neurodégénératives et certains types de cancer (Micha et al., 2017; Temple, 2000 cités dans Lauricella et al., 2017).

Surnommée « King of fruits », la mangue (*Mangifera indica* L.) dont la production mondiale avoisine les 50 millions de tonnes est cultivée sur les 5 continents (Del Pino et al., 2020). En 2013, seulement 3,85 % de la production mondiale a été exportée et le reste consommé localement (Siddiq et al., 2017). Paradoxalement, l'Inde, leader mondial en termes de production, n'en exporte que 1% par rapport au Mexique qui produit 10 fois moins mais reste leader en termes d'exportation. Cette configuration se traduit souvent par les habitudes alimentaires des pays producteurs, une organisation plus ou moins différente et maîtrisée de la chaîne de valeur et de la capacité à respecter les obligations qualitatives imposées par les pays importateurs. Dans les pays fortement exportateurs, la majorité des fruits exportés sont issus de plantations industrielles ne visant que les marchés extérieurs. Les variétés préférées des pays importateurs y sont cultivées avec des itinéraires cultureux permettant de maximiser les rendements puis avec une bonne maîtrise de la conservation et des circuits de distribution (Siddiq et al., 2017). Dans certains pays du Sud, les pertes avoisinant les 50 % (Baltazari et al., 2020) sont principalement dues aux pathologies, à l'esthétique des fruits jugés en inadéquation avec les standards du marché, mais aussi au manque de maîtrise de la gestion du pré-récolte et du post-récolte (stockage-maturation).

Le marché des produits transformés de mangue est aussi important, le goût du fruit étant désormais connu et apprécié dans le monde entier. Une partie des mangues non-aptées à la commercialisation en frais y trouve une valorisation, ce qui participe à la réduction des pertes. La pulpe de mangue mure est transformée en produits intermédiaires tels que la pulpe aseptique, les concentrés, les dés IQF (Individually Quick Frozen), ou en produits finis tels que les jus, les sorbets, ou les chips. Le séchage, avec ou sans imprégnation préalable en sucre et avec ou sans sulfitage est un procédé simple et robuste, souvent mis en œuvre dans les pays de production. En abaissant la teneur en eau des mangues, il confère aux produits une durée de conservation

de plusieurs mois à température ambiante et la réduction du poids et du volume facilite le stockage et le transport. Il conduit à des produits intéressants sur l'aspect nutritionnel et à fortes qualités d'usage. Par exemple, dans la déclinaison française « Fruits et légumes à l'école » du programme européen « School fruit, vegetables and milk scheme »¹, la distribution de fruits séchés est soutenue autant que celle de fruits frais. Les fruits séchés ont des conservations plus longues et plus faciles que les fruits frais.

Bien que le séchage soit pratiqué de partout, depuis toujours (Horner, 1997), sa maîtrise reste limitée et presque toujours basée sur l'expérience des opérateurs. Il en résulte, pour les mangues sèches naturelles un déficit de constance dans la qualité dû à l'hétérogénéité intrinsèque des tranches de mangues séchées, mais aussi à la transformation et au stockage peu maîtrisés. L'un des principaux défauts des mangues séchées reste cependant le brunissement des tranches de mangues, qui les rend peu appétentes et entraîne un rejet par les consommateurs. L'utilisation de produits de préservation et notamment de sulfites a permis de proposer sur le marché international des produits secs qui ont satisfait les consommateurs jusqu'à présent. Cependant, la meilleure connaissance des effets secondaires des additifs conduit les consommateurs à chercher de plus en plus des produits naturels.

La maîtrise de la qualité des fruits séchés sans additif impose d'améliorer les connaissances nécessaires à une unité de séchage : impact des conditions de séchage sur la qualité du produit final, mais ceux de la qualité des fruits avant séchage, du parage – découpe et, après séchage, de la conservation des fruits séchés. Depuis quelques années, cette dernière étape a une réponse qui permet des progrès très importants : la conservation des fruits secs naturels en température dirigée. Elle se répand tout au long des filières, des unités de séchage jusqu'aux importateurs – grossistes. L'utilisation de containers réfrigérés pour les transports internationaux devient la norme. A partir du sentiment de spécialistes du séchage de mangues que le point critique est la qualité des mangues fraîches, cette thèse a commencé par la quantification de l'effet d'un séchage considéré comme « bon » pour la qualité, pour des mangues fraîches de qualités très différentes. Le sentiment de spécialistes du séchage de mangues confirmé, elle s'est ensuite orientée sur l'obtention de mangues fraîches de bonne qualité et sur les moyens de disposer chaque jour de la bonne quantité de mangues fraîches de qualité pour bien remplir les séchoirs

¹ <https://www.interfel.com/nos-missions/encourager-la-consommation/des-fruits-et-legume-a-lecole/> consulté le 21 octobre 2021

sans perdre de produit. Cela est essentiel quand, pour une variété de mangues, la durée de la campagne annuelle de séchage est d'environ 20 jours.

I.1 *Le projet Interfaces*

La thèse s'inscrit dans le cadre du projet *Interfaces* : les transformateurs de produits biologiques savent bien que la qualité des produits initiaux est essentielle et les agriculteurs savent que leurs productions seront d'autant plus valorisables qu'elles correspondront aux attentes de l'aval de la filière, mais pour l'instant, ces « interfaces » restent à mieux maîtriser. Elles constituent un point clé pour intégrer voire exploiter la variabilité des matières premières dans les transformations, pour des systèmes alimentaires innovants plus performants. Soutenu par la Fondation Agropolis, le projet a pour objectif de créer un continuum de recherche entre le pré-récolte, le post-récolte et la transformation, pour mieux répondre au besoin des consommateurs en tenant compte de la variabilité qui peut être générée à chacune des étapes, de la production de la matière première au produit final. Au sein d'un même système de production, les fruits et légumes ne sont pas exactement dans les mêmes conditions nutritives et environnementales qui génèrent dès cette étape de la production des matières premières hétérogènes. Le stockage et la maturation sont mieux maîtrisés en termes de contrôle des paramètres appliqués grâce à la performance des systèmes d'asservissement et de monitoring, mais la variabilité initiale crée une qualité nuancée des matières premières prêtes à être transformées. Face à cette problématique, les opérateurs de transformation ont des systèmes de tri pour renoncer aux matières premières de qualité moindre, renforçant ainsi le gaspillage alimentaire, si elles ne sont pas utilisées par ailleurs dans un but alimentaire.

C'est pour aborder cette complexité que le projet *Interfaces* est né pour fusionner les compétences des acteurs régionaux du pré-récolte, du stockage - maturation et de la transformation pour améliorer la qualité des produits transformés. La pomme, la mangue et le raisin ont été les 3 matières premières sélectionnées pour les procédés de transformation respectifs en purée, en mangue sèche naturelle et en vin. Les équipes de recherche impliquées dans le projet tentent autour de 5 Workpackages :

- D'identifier l'effet des interactions entre les pratiques culturales et l'environnement sur l'établissement de la qualité des fruits à transformer, en mesurant des indicateurs (carbone, eau...),

- Développer des indicateurs pour identifier cette variabilité et adapter les opérations de transformation,
- Comprendre comment les opérations unitaires peuvent corriger les défauts des fruits transformés et ainsi lisser la qualité des produits finis,
- Déterminer la variabilité invisible par la connaissance de l'écologie microbienne et leur dynamisme en fonction des facteurs biotiques et abiotiques, pour tenir en compte de leurs qualités biopréservatives ou leur biotoxicité (mycotoxines, toxines...),
- Comprendre les enjeux et la régulation des marchés pour pallier aux différences de configurations organisationnelles au sein des chaînes d'approvisionnement qui ont ainsi un impact sur la qualité des produits fournis.

La thèse est incluse dans le 2^{ème} Workpackage (Interactions entre les fruits et les procédés) sur l'intégration des itinéraires culturels, du stockage-maturation et de la transformation de la mangue.

I.2 *Objectifs de la thèse*

L'objectif de la thèse est de développer des connaissances pour la maîtrise de la qualité des mangues sèches naturelles et plus particulièrement de leur couleur.

Cet objectif se décline en trois sous objectifs opérationnels :

- (i) Quantifier la dépendance de la qualité des mangues sèches respectivement à la qualité des mangues fraîches et au séchage ;
- (ii) Déterminer quels facteurs de pré-transformation ont un impact sur le comportement en séchage des mangues et quantifier cet impact. Les facteurs étudiés sont la variété, l'avancement dans la saison et le stade de maturité à la récolte, et les conditions de stockage-maturation ;
- (iii) Tester si certaines conditions de séchage pourraient permettre de corriger des défauts de qualité de mangues fraîches.

II. Synthèse bibliographique

II.1 *Du manguier aux mangues séchées*

Membre de la famille des *Anacardiaceae*, le manguier (*Mangifera indica* L.) est un arbre qui pousse dans les régions tropicales et subtropicales. La hauteur de l'arbre varie en fonction du milieu, du système cultural (sauvage ou en culture) et peut atteindre 40 m de haut (Mukherjee

and Litz, 2009). La canopée de forme ronde (Figure 1) et imposante renferme un feuillage vert durant toute l'année. Il existe plus d'un millier de variétés à travers le monde (Bally, 2006). Le manguier porte des fleurs mâles et des fleurs hermaphrodites qui assurent elles-mêmes leur fécondation mais sont aussi pollinisées par les insectes et le vent.

Son fruit, la mangue est une drupe de forme ronde, ovale ou réniforme et présente une couleur verte, jaune, violette ou rouge. Ces différences de caractéristiques phénotypiques sont essentiellement variétales mais pour de nombreuses variétés, la couleur aussi de la maturité du fruit. Après la nouaison, la croissance cellulaire est très rapide, suivie d'un élargissement cellulaire pendant environ 7 semaines (Yahia, 2011). Ensuite la croissance est plus lente jusqu'à atteindre la maturité physiologique. En fonction des cultivars, le temps entre la nouaison et l'atteinte de la maturité physiologie est entre 10 à 28 semaines (Yahia, 2011). Pendant la croissance, la mangue accumule de l'eau, des acides organiques, des minéraux et des glucides. Ces derniers sont majoritairement stockés sous forme d'amidon jusqu'au maximum à pleine maturité (Tandon and Kalra, 1983).

Ce stade auquel les mangues ont atteint leur plein potentiel physiologique en taille et en matière fraîche et sèche est appelé le stade vert-mature pour la majorité des variétés. Les mangues peuvent alors murir sur l'arbre ou être récoltées et murir en conditions artificielles, à température ambiante ou dirigée (Tandon and Kalra, 1983). Dans ce second cas, le début de maturation dépend de la variété et des conditions de stockage-maturation. Lors de l'exportation par cargo, les mangues sont stockées environ 20 jours à 10 °C. Arrivées dans les pays de destination, les mangues sont mises en chambre de maturation à des températures supérieures à 18 °C pendant une semaine (Sivakumar et al., 2011). La mangue étant un fruit climactérique, sa maturation est marquée par un pic de synthèse d'éthylène, une phytohormone à laquelle les mangues sont elles-mêmes sensibles. Pour synchroniser la maturation des mangues mises en chambre de maturation, un choc d'éthylène peut être pratiqué. Au cours de la maturation, les fruits passent par un pic de respiration. Des phénomènes biochimiques aboutissent à la maturation complète où la mangue aura développé tout son potentiel organoleptique. La teneur en chlorophylle responsable de la couleur verte diminue alors que la synthèse des caroténoïdes responsables des couleurs jaune-orangée se développe. L'acidité et la fermeté diminuent et les composés aromatiques se développent (Yahia, 2011). Les mangues deviennent très sucrées, aromatiques et juteuses, avec une faible acidité. Elles sont ainsi consommables en frais ou transformables.



Figure 1 : Manguiers et mangues de stade vert-mature cv. Kent au Sénégal à droite et cv. Cogshall à la Réunion (sources : Rosalie (2015) ; A. Diop).



Mangue sèche confite

Source : <https://www.cdiseout.com/au-quotidien/alimentaire/mangue-sechee/f-1270156-auc2009467914026.html>



Mangue sèche conventionnelle (sulfitée)

Source : <https://french.alibaba.com/product-detail/dried-mango-50028003981.html?spm=a2700.8699010.29.1.43526981B74oEm>



Mangue sèche naturelle

Source : <https://www.amazon.fr/Mangues-s%C3%A9ch%C3%A9e-sucre-ajout%C3%A9-sulfur%C3%A9s/dp/B01DOIWQJC>

Figure 2 : Types de mangues sèches

Dans cette thèse, la forme transformée de la mangue étudiée est la mangue séchée. Elle est obtenue par déshydratation de la pulpe de mangue fraîche par entraînement à l'air chaud. L'ensemble des activités et process d'unités de séchage de mangues naturelles artisanales est bien décrit dans (Rivier et al., 2009). Un aperçu rapide peut être regardé sur une vidéo du Coraf de 2014².

Pour maîtriser leur approvisionnement, toutes les stratégies sont utilisées dont notamment, au niveau des plantations, un contrôle avant chargement en camion par des « acheteuses » compétentes. Arrivées à l'unité, chaque mangue est inspectée manuellement chaque jour pour être classée selon la durée de maturation nécessaire pour qu'elle devienne transformable. Obtenir des mangues de qualité pour, chaque jour, bien remplir les séchoirs, avec des pertes aussi réduites que possible est un défi quotidien.

Cette situation décrite au Burkina Faso vers 2008 devient cependant en partie atypique. En effet, à l'époque, le Burkina Faso était le principal producteur mondial de mangues sèches naturelles et exportait peu de mangues en frais. Désormais, le séchage est souvent envisagé comme une activité complémentaire à l'export en frais. C'est notamment le cas en Côte d'Ivoire³ comme au Sénégal. Les refus d'export sont en quantités si importantes qu'ils déstabilisent les marchés locaux de mangues fraîches et voire conduisent à des mises en décharge. Ces co-produits d'exportations constituent des matières premières à bas coût pouvant donner des mangues de bonne qualité pour le séchage sous réserve de disposer de chambres de stockage – maturation et du savoir-faire correspondant. L'objectif est alors, à partir de mangues vert-mature, d'obtenir chaque jour des mangues de bonne qualité pour remplir au mieux les séchoirs, sans perdre de matière.

La mangue sélectionnée pour être transformée est débarrassée d'éventuelles impuretés de surface, trempée à l'eau chlorée puis rincée. Transférée en salle de parage, elle est épluchée puis découpée sous différentes formes en fonction du produit final désiré (tranches, lamelles dés...). La déshydratation se fait par séchage par entraînement à l'air chaud, parfois précédée d'une déshydratation – imprégnation en solution concentrée en sucres. Les conditions intensives imposées au produit au cours de la mise en œuvre de cette technique de déshydratation sont décrites par de très nombreuses publications (Defraeye, 2017; Dissa et al.,

² <https://www.youtube.com/watch?v=7gW73tmVy28> consulté le 24 octobre 2021.

³ <https://video-streaming.orange.fr/actu-politique/made-in-africa-le-parcours-du-combattant-de-la-mangue-ivoirienne-CNT000001r2L5S.html> consulté le 24 octobre 2021

2010; Goyal et al., 2006; Hernández et al., 2000; Ruiz-López and García-Alvarado, 2007). Les pièces de mangues introduites en séchoir commencent par se réchauffer jusqu'à la température d'air humide (« phase 0 » aussi nommée « période de mise en température ; Bonazzi and Bimbenet. (2003)). Par exemple, La température d'une tranche de mangues initialement à 20 °C va augmenter jusqu'à atteindre 39,7 °C après introduction du produit dans un air à 60 °C et 30% HR, avec l'hypothèse simplificatrice d'une résistance aux transferts entre l'air et la mangue négligeable. Ce phénomène est souvent très rapide. Dans un deuxième temps, les transferts externes sont limitants (« phase 1 » aussi nommée « période à vitesse de séchage constante » ; Bonazzi and Bimbenet. (2003)) : la surface de la tranche de mangue est suffisamment approvisionnée en eau depuis l'intérieur pour qu'elle reste saturée en eau. La température du produit reste proche de la température humide d'air, et l'ensemble du produit, y compris la surface reste à une activité d'eau proche de 1. L'interface produit – air ne se modifiant pas, la vitesse de séchage est constante. Lorsque l'approvisionnement en eau de la surface n'est plus suffisant pour compenser l'évaporation, la « phase 2 », aussi nommée « période à vitesse décroissante » commence (Bonazzi and Bimbenet, 2003). Elle dure jusqu'à la fin du séchage. La température du produit monte peu à peu depuis la température d'air humide jusqu'à la température d'air sec. L'abaissement de la teneur en eau qui se propage de la surface vers l'intérieur s'accompagne d'un abaissement significatif de l'activité en eau.

Les cinétiques de séchage de pièces de mangue ont été modélisées par des modèles décrivant l'évolution temporelle de la teneur en eau moyenne (Desmorieux, 1992) et par des modèles de type diffusifs (Dissa et al., 2008; Janjai et al., 2008). Les outils numériques obtenus représentent bien les données expérimentales. Ils ont été utilisés pour le choix de séchoirs et de dimensionnement, ainsi que pour simuler le fonctionnement de séchoirs semi-continus à charriots de claies (Desmorieux et al., 2008). Dissa et al., (2011) montrent que, pour la variété Kent, les mangues immatures sèchent plus lentement que celles matures.

Le séchage permet l'obtention d'un produit qui se conserve plus longtemps avec des caractéristiques sensorielles différentes de la mangue fraîche. Elles sont consommées seules en snack ou entrent dans la composition de mélange de fruits séchés ou dans la formulation d'autres aliments transformés (muesli, barre énergétique, yaourt...). Il existe 3 types de mangues séchées qui sont d'après Arnoldus et al. (2009) : les mangues sèches conventionnelles, les mangues sèches sucrées et les mangues sèches naturelles (Figure 2). Ces trois produits sont présentés ci-après.

- **Les mangues sèches confites**

Elles sont fabriquées par immersion des tranches ou dés dans des solutions concentrées en sucres et sulfites, puis séchées. Avec une humidité comprise entre 10 et 15%, elles présentent une texture moelleuse qui se démarquent des autres gammes de mangues séchées. Contenant jusqu'à 65% de sucre, elles sont très caloriques et le goût sucré masque en partie l'arôme de mangue. Cette gamme est la plus utilisée dans les mélanges de fruits secs (Arnoldus et al., 2009).

- **Les mangues sèches conventionnelles (sulfitées)**

Sulfitées avant séchage, les mangues sèches conventionnelles ont une Date de Durabilité Minimale (DDM) de l'ordre d'une année à température ambiante. Moins caloriques que la mangue sèche sucrée, elle conserve très bien la couleur jaune-orangée de la mangue, est très savoureuse et sa qualité est jugée bonne et constante. Elle est très appréciée en snack ou dans la fabrication de muesli secs (Arnoldus et al., 2009). Ce produit est considéré comme la référence parmi les autres segments concernant la couleur, le goût, la texture, la forme et l'homogénéité des lots. Elle contient entre 14 et 18% d'eau (22% pour la qualité extra tendre). Les variétés les plus fréquemment utilisées sont la Kent, la Keitt et la Tommy Atkins mais les deux premières sont préférées car elles sont moins fibreuses.

Le principal inconvénient qualitatif est lié à la présence de sulfites responsable d'un nombre de plus en plus important de cas d'allergies et d'hypersensibilité. La mention en tant qu'allergène est obligatoire en Union Européenne comme aux Etats Unis si la concentration est supérieure à 10 mg.kg⁻¹ ou 10 mg.l⁻¹. En Europe, la concentration maximale autorisée par le règlement (UE) N°1129/2011 de la commission du 11 novembre 2011 est de 500 mg.kg⁻¹ dans la majorité des fruits secs dont les mangues, et va jusqu'à 2000 mg.kg⁻¹ pour les abricots, pêches, raisins prunes et figues séchés.

- **Les mangues sèches naturelles**

Les mangues sèches naturelles, produits d'intérêt de cette thèse, sont obtenus uniquement par séchage (solaire ou artificiel) de mangues fraîches épluchées et découpées, sans ajout de conservateurs, d'additifs, de sucres ou de colorants. Les mangues fraîches peuvent être issues de vergers biologiques ou du commerce équitable. Seulement 10 à 20% de cette gamme est certifiée biologique (Arnoldus et al., 2009). Elles sont essentiellement consommées en snack.

Même s'il est clair qu'elles sont plus diététiques avec une saveur plus prononcée grâce aux variétés utilisées, d'après Arnoldus et al. (2009), l'argument nature et santé ne vient qu'en 6^{ième} position sur les critères de choix des clients. Les variétés de mangues utilisées sont principalement l'Amélie (plus acidulée) et la Brooks (goût plus apprécié). Les mangues sèches naturelles sont très prisées par les consommateurs mais les distributeurs déplorent un déficit d'homogénéité et de constance dans la qualité des produits fournis. Les pays exportateurs de mangues sèches naturelles des différents pays d'Afrique de l'Ouest utilisent des technologies de séchage très différentes, majoritairement peu modernes et ne permettant souvent qu'une faible maîtrise de la qualité (Arnoldus et al., 2009). Bien qu'il existe quelques organisations locales de producteurs, il n'existe pas de normes communes à toute la sous-région ni de coordination entre les opérateurs. Les consommateurs non-avertis obtiennent alors une qualité au hasard, en fonction de la zone d'origine et du type de production.

II.2 *Défauts de qualité des mangues sèches naturelles*

Les mangues sèches doivent être d'une belle couleur orangée pour être achetées, condition nécessaire pour qu'elles soient ensuite consommées. La couleur est alors le premier critère de sélection. Elle constitue le principal désavantage qualitatif des mangues séchées naturelles comparativement aux mangues séchées sulfitées. A température ambiante, les mangues naturelles les mieux séchées restent orange quelques mois puis brunissent. Désormais, la conservation au froid est utilisée dans la filière depuis l'unité de séchage jusqu'au grossiste, même si elle contribue à une contrainte importante et que son coût est significatif. Dans d'autres filières telles que celle des dattes naturelles, cette pratique est aussi en cours de généralisation. Une fois achetée et mise en bouche, la mangue naturelle doit posséder un arôme fruité, typique de la variété. Sa texture est cependant de type « cuir » et l'adhérence aux dents est importante alors que les produits sulfités, imprégnés en sucres ou pas, sont plus faciles à mâcher : la stabilisation microbiologique apportée par les sulfites permet des teneurs en eau sensiblement plus élevées, sans risque de détérioration. Améliorer ces aspects de la qualité des mangues sèches naturelles renforcerait leur intérêt.

II.2.1 *Défauts de couleur des mangues sèches naturelles*

Les mangues non sulfitées peuvent être sujettes lors du séchage et pendant la conservation au brunissement par des réactions enzymatiques et non enzymatiques. La couleur varie du jaune orangé proche de la mangue fraîche vers du marron-noirâtre après brunissement. Il existe plusieurs méthodes de mesure directes pour quantifier ces changements de couleur mais, faute de permettre d'en connaître l'origine, elles ne sont exploitables que par des personnes possédant

du savoir-faire ou lors de recherches expérimentales. Ainsi, la colorimétrie utilisée dans les études de Akoy et al. (2008), Chen et al. (2007), Izli et al. (2017) et Sehwat et al. (2018), qui se réfèrent aux valeurs des indices colorimétriques L^* , a^* , b^* , C^* et h° est bien corrélée à la perception par des jurys ou des consommateurs. La couleur des mangues fraîches est fortement corrélée à la teneur en caroténoïdes (Ornelas-Paz et al., 2008; Rosalie et al., 2018). Par contre, bien que les composés bruns soient connus, il n'est pas possible de les doser faute de pouvoir les extraire quantitativement. Des mesures d'éléments liés aux changements de couleur sont aussi utilisées mais rares sont celles pouvant être quantitativement exploitées pour prédire la couleur. Il en est ainsi des mesures des teneurs en composés intermédiaires de la réaction de Maillard. Par exemple, Korbel et al. (2013a) montrent que la concentration en 5HMF n'est pas corrélée à la couleur. Il en est de même pour l'activité enzymatique des polyphénols oxydases pour le brunissement enzymatique (Korbel et al., 2013c). La teneur en caroténoïdes et leur dégradation, l'oxydation de la vitamine C et la disparition des composés précurseurs de la réaction de Maillard (hexoses réducteurs, acides aminés) peuvent permettre d'évaluer le brunissement (Mahayothee et al., 2007; Maskan, 2001; Yitayew and Fenta, 2021).

Maîtriser les brunissements nécessite de connaître leurs origines, les cofacteurs et les paramètres pouvant permettre de les limiter.

II.2.1.1 Le brunissement enzymatique

La découpe des mangues pour le séchage lèse des cellules qui libèrent leurs contenus et favorise le contact entre les enzymes responsables du brunissement enzymatique et leurs substrats. Les polyphénol-oxydases (PPO) et les peroxydases (POX) sont les enzymes qui catalysent la réaction d'oxydation des composés phénoliques. Cette réaction initie une succession d'autres réactions provoquant la formation de pigments bruns appelés mélanines (Korbel et al., 2013a) responsables de la couleur brune observée. Pour limiter ces réactions, il est courant :

- De rincer les surfaces de tranchages ;
- De faire un blanchiment thermique pour dénaturer les PPO, et dans une moindre mesure les POX qui sont plus résistantes à la température (Ndiaye et al., 2009) ;
- D'ajouter des composés abaissant le pH : l'ajout d'acides tels que l'acide citrique et l'acide ascorbique permet de sortir de la gamme de pH optimale d'activité des enzymes (entre 4 et 8) et d'inhiber le brunissement enzymatique (Robles-Sánchez et al., 2009; Sogi et al., 2015) ;
- De conserver au froid car l'activité optimale des enzymes se trouve entre 20 et 50 °C (Korbel, 2014) ;

- De conserver en l'absence d'oxygène avec un conditionnement sous atmosphère modifié (González-Aguilar et al., 2000) ;
- D'ajouter des réducteurs tels que les sulfites qui sont reconnus comme étant les additifs les plus efficaces contre le brunissement des fruits (Billaud et al., 2005).

Le brunissement enzymatique est aussi favorisé par les teneurs en eau élevées. Ainsi, après la découpe des mangues, la première phase de séchage caractérisée par une activité en eau du produit élevée, est celle où les réactions enzymatiques surviennent. Korbel et al. (2013a) ont montré que les PPO étaient plus thermorésistants aux a_w élevées. Pour un même temps de traitement thermique (8h), l'activité des PPO était presque totalement inhibée (activité résiduelle 3,6%) à une a_w de 0,65 alors qu'à une a_w de 0,98, l'activité résiduelle reste vers 69%.

II.2.1.2 Le brunissement non-enzymatique

Le brunissement non-enzymatique des mangues est attribué principalement à la réaction de Maillard (Korbel et al., 2013a; Pott et al., 2005) même si d'autres réactions telles que la dégradation de l'acide ascorbique et des caroténoïdes ont lieu.

II.2.1.2.1 La réaction de Maillard

La réaction de Maillard ou plutôt les réactions de Maillard commencent par une condensation entre le groupement amine de composés organiques (acide aminé, protéine) et le groupement carbonyle de sucres réducteurs (glucose, fructose, lactose, ribose) (Kwak and Lim, 2004). Des réactions se développent ensuite en parallèle et/ou en série. La couleur brune – rouge issue des réactions de Maillard vient de certains de ses composés finaux, les mélanoïdines (Wijewickreme et al., 1997). Insolubles ou solubles de manière non-quantitative, elles ne peuvent être bien quantifiées malgré de nombreuses tentatives. Les réactions de Maillard sont favorisées par les températures élevées lors des process de transformation mais elles se développent aussi de manière significative lors de conservation longues à des températures plus faibles (Z de Bigelow de l'ordre de 19 °C) comme celles pratiquées pour conserver les fruits secs (Labuza and Saltmarch, 1981). La présence de ses précurseurs (sucres réducteurs et acides aminés) mais aussi de paramètres physico-chimiques tels que le pH et l'activité de l'eau (Korbel, 2014) jouent fortement sur la cinétique.

Lors du séchage, ces réactions sont moindres car les températures de séchage sont relativement peu élevées, appliquées pendant des temps courts. Il a été rapporté qu'à 55 °C l'étude cette réaction est idéale car la dégradation de Stecker et la caramélisation sont très lentes (Bellion,

1992). Cependant, les réactions surviennent lors de la conservation à température ambiante ou même lors d'un stockage au froid, mais très lentement. La plage a_w optimale du brunissement non enzymatique est comprise entre 0,5 et 0,75 (Labuza and Saltmarch, 1981). Faute de pouvoir doser les mélanoidines, le suivi des réactions de Maillard est souvent réalisé par l'observation de la disparition des précurseurs (sucres réducteurs et acides aminés) ou de l'apparition de composés intermédiaires tels que les 5-HMF est souvent effectué (Wilson et al., 2014). La zone critique d'occurrence de la production de 5-HMF est située entre des a_w comprises entre 0,5 et 0,7 comme indiqué sur la figure 3 (Korbel et al., 2013a). C'est pour ces mêmes valeurs d' a_w que les acides aminés les plus abondants (asparagine et acide glutamique) ont totalement disparu à la suite du traitement thermique. Il a aussi été constaté que le saccharose a été hydrolysé par l'action de l'invertase pour laisser apparaître le glucose et le fructose qui ont été partiellement consommés par la réaction de Maillard. L'ensemble des données converge pour conclure que c'est bien à une a_w de 0,6 que le brunissement non enzymatique se développe le plus vite lors des traitements thermiques. L'idée générale peut être retenue, mais l' a_w optimale est probablement un peu supérieure, les mesures d' a_w n'ayant été réalisées qu'à 25°C.

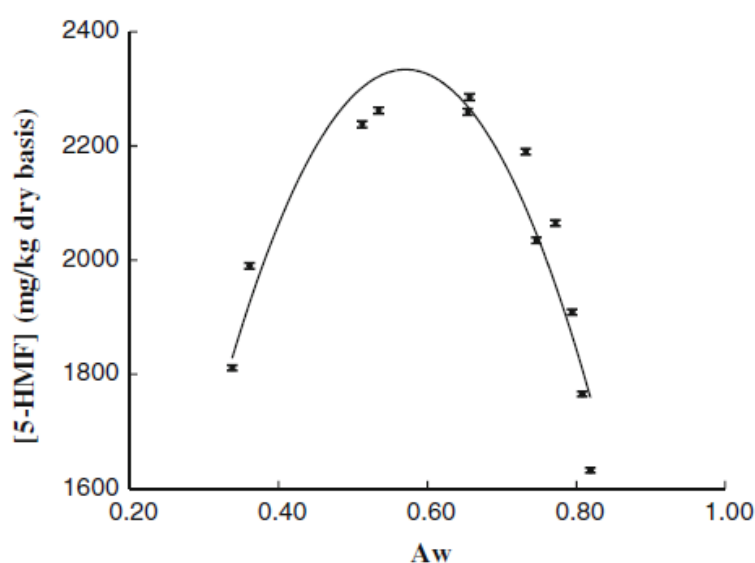


Figure 3 : Evolution des 5-HMF en fonction de l' a_w après le traitement thermique (Korbel et al., 2013a)

II.2.1.2.2 Brunissement due à la dégradation des caroténoïdes lors du séchage et de la conservation

Lorsque la couleur orangée est maintenue par le séchage, elle dépend essentiellement de la teneur en caroténoïdes qui augmente avec la maturité. Les mangues sèches issues de mangues non mûres (pulpe verte) ont des teneurs en caroténoïdes inférieures à celles des mangues sèches issues de mangues mûres de couleur jaune-orangée (Mahayothee et al., 2007).

La dégradation du β -carotène est une des causes du brunissement des fruits (Mahayothee et al., 2007). Elle serait principalement due aux pertes liées à l'exposition à la chaleur, qui provoqueraient leur oxydation (Chen et al., 2007). Le séchage par un procédé qui ne fait pas monter la température du produit au-delà des températures ambiantes, associé à du vide profond ou pas, permet d'obtenir des mangues avec des modifications de couleur très négligeables après séchage, par rapport aux mangues séchées à l'air chaud (Schrawat et al., 2018). L'étude menée par Chen et al. (2007) a permis de mettre en évidence l'effet de la température sur les caroténoïdes et la couleur en comparant un séchage à l'air chaud et une lyophilisation. Le premier a entraîné une dégradation plus importante de la couleur et des all-trans-bêta-carotènes par rapport à la lyophilisation mais aussi une baisse de 40% des teneurs en violaxanthine, en néoxanthine (20%) et en néochrome (48.6%). De même, Sogi et al. (2015) ont montré que les procédés chauds entraînent une baisse significative (jusqu'à environ 30%) des teneurs en caroténoïdes par rapport aux teneurs d'une pulpe lyophilisée.

Selon Korbel et al. (2013), le stockage a une part très importante dans le brunissement des mangues sèches naturelles. L'augmentation du brunissement des mangues séchées lors de la conservation est concomitante à la baisse de 8% de la teneur en β -carotène (Rankins et al., 2008).

II.2.1.2.3 La dégradation de l'acide ascorbique et des composés phénoliques

L'oxydation de l'acide ascorbique, fait partie des phénomènes qui contribuent à la dégradation de la couleur (Yao et al., 2020). Elle est significativement plus importante lors du séchage à l'air chaud par rapport aux autres procédés en quasi anaérobiose (Schrawat et al., 2018). Une rétention comprise entre 36 et 48% de l'acide ascorbique a été obtenue lors du séchage conventionnel contre 73 à 81% pour la lyophilisation. Les conditions aérobies du séchage conventionnel seraient l'origine de la dégradation de l'acide ascorbique (Schrawat et al., 2018). Cette baisse augmente aussi avec la température. Il en est de même pour la dégradation des composés phénoliques (Sogi et al., 2015). En effet, une différence de rétention des composés

phénoliques de 23% a été constatée lors du séchage conventionnel par rapport à la lyophilisation et cette baisse est d'autant plus importante avec l'augmentation de la température (Sehrawat et al., 2018). La même tendance a été observée par Izli et al. (2017) qui concluent que le séchage à l'air chaud entraîne par conséquent une baisse significative de la capacité antioxydante des mangues séchées, surtout à 80 °C.

II.2.2 Le séchage affecte le gout et la composition aromatique des mangues

L'évaporation de l'eau lors du séchage entraîne une concentration en matières sèches. La teneur en eau passe de 80,4 à 17,2% MH, l'extrait sec soluble de 15,8 à 89,2 °Brix, l'acidité titrable de 5,5 à 17,9 meq.100 gMH⁻¹ pour la variété cv. Amélie (Kaméni et al., 2003). La mangue séchée est ainsi un produit différent de la mangue fraîche tant au niveau gustatif que dans le type d'utilisation et le segment de marché pour les consommateurs.

Lors du séchage des mangues, plusieurs réactions affectent les sucres et les acides. Pour les sucres, Korbel et al. (2013a) ont montré qu'il y avait une hydrolyse partielle du sucrose en glucose et fructose, probablement du fait de l'action de l'invertase. Le séchage peut aussi entraîner une dégradation significative de l'acide citrique et de l'acide malique (Rodríguez et al., 2017). Ces dégradations auraient des effets sur le goût car les paramètres physico-chimiques impliqués sont affectés mais elles ne doivent pas être importantes. Aucune étude n'a mis en évidence des différences de perception sensorielle liées aux modifications des sucres et acides par le séchage.

La composition aromatique des mangues peut être sensiblement modifiée par le séchage (Figure 4). Ce dernier entraînerait une baisse de 59% des composés aromatiques volatiles lors d'un séchage de tranches de 8 mm d'épaisseur de mangues cv. Amélie à 60 °C-40% HR pendant 7h (Bonneau et al., 2016). Cette baisse est essentiellement due à leur évaporation notamment les monoterpènes et sesquiterpènes (plus de 60% de la quantité initiale). L'autre phénomène constaté lors de cette étude est la formation de composés aromatiques nouveaux causée par la température de séchage, l'hydrolyse, l'oxydation et la dégradation de certaines molécules. Il s'agit du 2-furfural, 5-méthylfurfural and 2-pentylfurane qui ont été thermo-générés mais aussi d'autres composés alcooliques, des aldéhydes et des cétones dont les quantités ont été augmentées ou qui ont été nouvellement synthétisés (Bonneau et al., 2016).

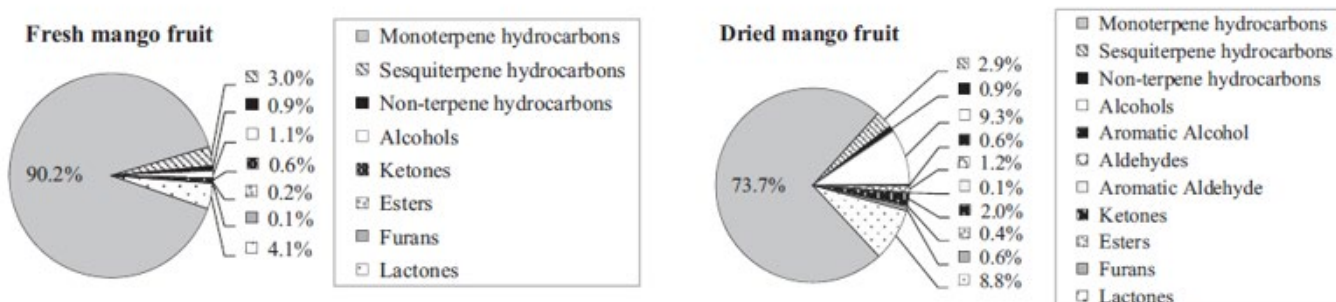


Figure 4 : Distribution des composés aromatiques (en classe %) dans la mangue fraîche et séchée (Bonneau et al., 2016)

Bien que dans sa thèse A Bonneau soit allée au-delà des quantifications, jusqu'à l'identification des composés caractéristiques de l'arôme des mangues *Amélie*, elle n'a pu établir les relations entre les modifications de composition provoquées par le séchage et les modifications de perception d'arôme. Il est bien connu que ceux-ci sont parfois des composés en concentration très faibles qui constituent l'essentiel d'un arôme perçu. Dans un contexte Réunion – Sénégal, pour tenter d'étudier les modifications d'arômes dues au séchage, et l'impact des conditions pré-post-récolte sur ces modifications, un énorme travail préparatoire serait nécessaire pour disposer des données de base pour les variétés de ces contrées. Une exploration a été conduite dans le cadre de notre travail mais la démarche a été stoppée du fait de sa trop grande ampleur.

II.3 *Qualité de la mangue fraîche*

La définition de la qualité des fruits est variable selon qu'on s'adresse à des chercheurs, producteurs, transformateurs, exportateurs, détaillants et consommateurs (Shewfelt, 1999). Selon Shewfelt (1999), la ligne de démarcation entre les concepts de qualité est i) l'orientation produit pour les chercheurs, producteurs et manipulateurs post-récolte et ii) l'orientation consommateur pour les consommateurs, les spécialistes du marketing et les économistes. Si les premiers chercheront à définir la qualité comme une série d'attributs sélectionnés qui sont mesurables avec précision, les seconds visent à comprendre le comportement, les désirs et les besoins du consommateur en termes de préférences sensorielles et nutritionnelles. Dissocier totalement les orientations peut avoir des conséquences fortes. L'orientation produit conduit à mettre l'accent sur le rendement, l'apparence, les longues durées de conservation, la résistance aux manutentions et transport et les prix de revient faibles au détriment des caractéristiques organoleptiques intrinsèques. L'orientation consommateur est aussi très complexe du fait de préférences très diverses des consommateurs, que l'amont des filières fruitières est incapable de satisfaire (Shewfelt, 1999).

Il existe bien un consensus scientifique sur le fait que la construction de la qualité des mangues débute d'abord par les choix de culture (variété, type de verger de production...). Ensuite, la qualité évolue selon les conditions agronomiques de conduite de culture et de récolte. La formation de la qualité se termine lors des transports, emballage, stockage et maturation. Si les conditions de croissance définissent le potentiel de qualité des mangues à la récolte, ce sont les conditions de stockage-maturation qui déterminent le développement de ce potentiel.

Selon Léchaudel, (2004), la qualité de la mangue fraîche à la récolte dépend de l'alimentation carbonée, hydrique et azotée en dernier lieu. Les différents flux d'assimilats vers le fruit déterminent la concentration en métabolites et la composition des mangues lorsqu'elles atteignent leur maturité physiologique. Les conditions de stockage-maturation des mangues physiologiquement matures définissent par la suite les séries de transformations biochimiques qui conduisent au développement des composés d'intérêt gustatif et nutritionnel. Selon Nordey, (2014), la qualité organoleptique regroupe les caractéristiques externes (taille, forme et couleur) et internes (saveurs sucrée, acide, couleur interne) qui dépendent de la concentration en composés primaires (sucres, acides) et secondaires (pigments, arôme, vitamines).

La maîtrise de certains paramètres pré-récolte est parfois limitée : impossible d'arroser moins qu'apporté par la pluie et difficile de moduler la température imposée par la météo. Il existe cependant un certain nombre de choix de paramètres qui, optimisés, permettent d'espérer des mangues de bonne qualité.

II.3.1 La qualité dépend de la variété

La variété est le premier critère de choix d'une qualité attendue. Les différences de couleur de peau et de pulpe sont d'abord variétales (Elsheshetawy et al., 2016; Nambi et al., 2016). Certaines variétés restent vertes après la maturation tandis que d'autres changent de couleur du fait de changements physiologiques et de composition de la peau (Ullah et al., 2016). Les composés aromatiques et leur abondance dans le profil total dépendent de la variété (Bonneau, 2016) (Figure 5). Même si la majorité des profils aromatiques est principalement composée de monoterpènes à des ratios sur le total différents, le pourcentage des autres composés tels que les sesquiterpènes n'est pas le même selon la variété et influence la perception aromatique globale. Les teneurs en sucres solubles et l'acidité des manges dépendent aussi de la variété (Ellong et al., 2015; Kameni et al., 2003). Une caractéristique essentielle pour le séchage est la siccité car elle détermine le rendement matière au séchage. Ainsi, 100 kg de pulpe de mangues initialement à 79%MH d'eau séchés à une teneur en eau résiduelle de 14%MH donneront 24.4

kg de mangues sèches naturelles. La même masse de pulpe fraîche, à une teneur en eau de 81% en base humide (MH), ne donnera que 22,1 kg secs, soit une masse en moins à vendre de 2,3 kg (10%).

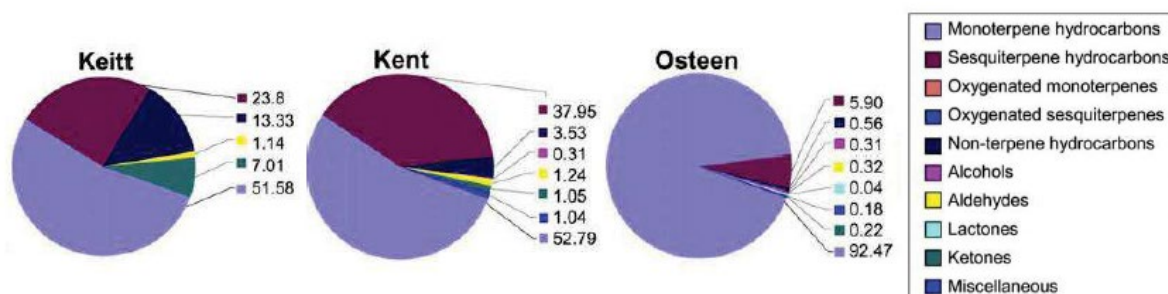


Figure 5 : Profil aromatique de 3 variétés de mangues (Bonneau. (2016); extrait de Pandit et al. (2009))

II.3.2 L'itinéraire culturel définit la qualité à la récolte

Les facteurs environnementaux ont un impact considérable sur la croissance des fruits, les paramètres de qualité et le comportement post-récolte des mangues (Léchaudel and Joas, 2007).

II.3.2.1 Une bonne exposition à la lumière pour des mangues plus sucrées

L'environnement lumineux joue un rôle primordial dans l'activité photosynthétique des feuilles. Les branches fructifères supportant les feuilles et les fruits reçoivent une quantité de lumière différente en fonction de leur position dans la canopée. Le manguier alloue des ressources en azote aux parties de l'arbre qui reçoivent plus de rayonnement lumineux, améliorant ainsi la capacité photosynthétique ainsi que l'accumulation en carbone qui a un rapport direct avec le volume et la matière sèche des fruits (Léchaudel and Joas, 2007). Cette localisation des apports nutritifs est bien connue des agriculteurs et des chercheurs en agronomie. Pour leurs essais, ces derniers vont éliminer des jeunes fruits puis considérer comme facteur le *nombre de feuilles par fruit* au niveau d'une branche. La matière sèche des mangues étant composée de 60% de carbohydrates (dont les sucres et acides), leur teneur influe directement sur la saveur de la mangue (Tableau 1) (Léchaudel and Joas, 2007; Ueda et al., 2000). Les mangues ayant assimilé plus de matières sèches sont plus sucrées.

L'autre influence de la lumière sur la mangue concerne sa couleur. Pour certaines variétés, les mangues ayant reçu plus de rayonnement lumineux ont une couleur plus rouge que celles à l'intérieur de la canopée qui restent plus vertes. Ceci est dû à l'accumulation des anthocyanes qui est due à une forte exposition au soleil (Nordey et al., 2014a). Par ailleurs, il est possible

que les différences d'illumination induisent des différences de richesses en chlorophylle, alors qu'elles peuvent être utilisées comme indicateurs de maturité physiologique sur arbre, mesurées par fluorescence (Léchaudel et al., 2010).

Tableau 1: Effet de la position du fruit sur l'arbre sur la qualité de la mangue 'Kensington' (Léchaudel and Joas, 2007)

Fruit position	Fruit mass (g)	Dry matter (%)	Days to eating soft	Total sugars (°Brix)
Upper	360	13,1	13,4	11,6
Middle	370	13,0	14,5	11,6
Lower	346	11,6	15,9	10,5

II.3.2.2 Comptabiliser une somme des températures suffisante

Les conditions climatiques qui varient d'une année à l'autre ont une forte incidence sur la croissance des fruits. La taille des mangues et la teneur en matières sèches différentes sont fonction du nombre de degré-jours qu'elles ont comptabilisé à partir de la pleine floraison (Léchaudel et al., 2005). Des différences significatives de la taille des fruits ont été constatées en fonction des saisons à cause des changements de température d'une année sur l'autre (Léchaudel et al., 2005; Léchaudel and Joas, 2007). Ce critère est cependant difficile à utiliser car (i) au cours d'une même saison et sur un même arbre se produisent souvent 2 à 3 floraisons et (ii) les températures peuvent sensiblement varier selon la position des mangues sur et dans l'arbre.

II.3.2.3 La disponibilité de l'eau et du carbone :

Le stress hydrique affecte la taille des mangues lorsqu'il survient entre la floraison et la première moitié de la période de croissance, mais il n'a aucune incidence sur la taille lorsqu'il survient 1,5 semaines avant la récolte (Tableau 2) (Léchaudel and Joas, 2007; Simmons et al., 1995). La taille des fruits issus d'un arbre ayant subi un stress hydrique était inférieure de 34% à celle des fruits issus d'un arbre correctement irrigué. Ceci est dû à une baisse de l'assimilation du carbone et des flux d'eau entrant. Ces facteurs influent sur le nombre de divisions cellulaires. La taille du fruit est aussi influencée par le rapport nombre de feuilles de la branche fructifère / nombre de fruits. Les mangues portées par des branches fructifères avec de nombreuses feuilles sont plus grosses que celles portées par des branches avec peu de feuilles. L'apport de glucides dans le mésocarpe est corrélé positivement à la capacité de synthèse de glucide de la branche (Léchaudel and Joas, 2007).

Tableau 2 : Effets du stress hydrique sur le nombre et la taille des cellules de mangue 'Kensington', l'épaisseur des cuticules et la masse du fruit à la récolte, et sur la qualité (Léchaudel and Joas, 2007)

Treatment	Control	Water stress (time for application)		
		Early	After cell division	Preharvest
Cell number	345.9 a	280.1 b	249,6 a	319,8 a
Cell size (µm)	97,5 a	96,3 a	68,0 b	95,7 a
Cuticle thickness (µm)	12,9 c	14,3 b	17,5 a	13,5 bc
Fruit mass (g)	513,0 a	343,5 b	350,2 b	478,8 a
Shelf life (days)	13,6 b	15,2 a	11,7 c	13,4 b
% Dry matter	13,9b c	12,7 c	17,4 a	14,4 b
% Internal chilling injury	7,2 b	0,0 b	37,7 a	5,0 b
% External chilling injury	5,2 b	2,5 b	61,7 a	12,5 b
Green skin (%)	2,7 b	9,8 a	12,2 a	3,2 b

II.3.2.4 Le stade de récolte

Il correspond à la dernière possibilité de maîtrise de la qualité du fruit au champ en termes de composition physico-chimique et de conservabilité. La qualité de la mangue est d'autant meilleure que la maturité à la récolte est avancée (Figure 6). Cependant, une mangue récoltée précocement est acide et peu sucrée, mais se conserve plus longtemps. Le décompte du nombre de jours après la floraison, c'est-à-dire à partir du moment auquel plus de 50% des panicules des arbres sont ouverts (Nordey, 2014) a été utilisé. Avec cet indice, Zagade and Relekar, (2014) ont constitué des lots de mangues récoltés en récoltant à 4 dates différentes. Des différences qualitatives significatives ont été observées entre les différents lots. Cependant, leur protocole masque l'influence des paramètres environnementaux, qui n'ont pas été les mêmes pour tous leurs fruits.

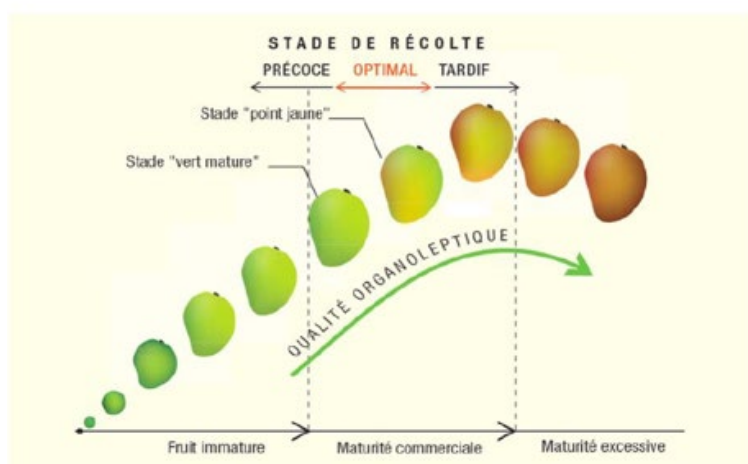


Figure 6 : Evolution de la qualité de la mangue en fonction de son stade de maturité (Joas and Lechaudel, 2009)

II.4 *Le stockage maturation définit la qualité organoleptique*

Différentes conditions de stockage-maturation sont utilisées selon la destination des mangues. Les mangues exportées en cargo sont récoltées au stade vert-mature puis stockées à 10 °C pendant environ 3 semaines pour les transporter jusqu'au pays importateur puis muries à température dirigée par les importateurs (Sivakumar et al., 2011). Les altérations sont limitées pendant la phase à 10 °C (Slaughter, 2009).

En Afrique de l'Ouest, les sécheurs s'approvisionnent en majorité 2 fois par semaine (Rivier et al., 2009). Equipés seulement de salles de stockage aérées, les conditions de maturation dépendant fortement du climat local. Celles-ci peuvent varier fortement en cours de campagne. Par exemple, au Burkina Faso, il est fréquent que le début de campagne se fasse en saison sèche, puis que les pluies arrivent. Les travaux de Baloch and Bibi, (2012) ont montré que les dynamiques de maturation, les compositions physico-chimique et biochimique, la qualité sensorielle dépendaient très nettement de la température et la durée de maturation.

II.4.1 *Impact des conditions de maturation sur la couleur*

La couleur de la peau et de la pulpe évolue du vert au jaune orangé au cours de la maturation. Cette évolution est essentiellement due à l'accumulation des caroténoïdes (Vásquez-Caicedo et al., 2006) et à la dégradation de la chlorophylle (Zhang et al., 2014). La synthèse des caroténoïdes est accentuée par une température de maturation élevée (Mahayothee et al., 2007; Rosalie et al., 2018) qui induit une augmentation de l'activité des enzymes impliquées dans leur biosynthèse (Fu et al., 2019). Tel que montré par Baloch and Bibi, (2012), les mangues muries à des températures supérieures à 30 °C ont une couleur très orangée et une teneur en caroténoïdes élevée, tandis que celles muries à 20 °C ont une couleur qui tend plutôt vers le jaune avec une teneur en caroténoïdes plus faible ($p < 0,05$). Dans cette étude, une évaluation sensorielle avait aussi permis de montrer que les mangues muries à 30 ou 40 °C avaient une couleur plus appréciée par les consommateurs que celles muries à 20 °C.

II.4.2 *Impact des conditions de maturation sur la fermeté des mangues*

La couleur et la fermeté sont les premiers critères d'évaluation de la maturité des mangues. Bien que des méthodes d'évaluation performantes de la maturité existent dans les pays très industrialisés, l'évaluation de la maturité par pression douce avec les doigts est la plus utilisée dans les pays producteurs comme par les consommateurs. A la récolte, les mangues de maturité physiologique (vert-mature pour la majorité des variétés connues) ont une fermeté élevée. Cette fermeté correspond aussi à une bonne capacité des mangues à être transportées, avec une résistance aux chocs plus élevée lors de la récolte, de la manutention et du transport. Cette

fermeté décroît lors de la maturation. Cette baisse vient de l'altération de la structure et de la composition des parois cellulaires (peau et pulpe) et de la diminution de la teneur en amidon de la pulpe (Schouten et al., 2018; Valente et al., 2004). Lors de la maturation, une augmentation de l'activité des enzymes impliquées (polygalacturonase, amylase, pectinestérase, bêta-galactosidase...) a été nettement mise en évidence, en lien avec le pic de synthèse d'éthylène et la baisse de fermeté (Schouten et al., 2018). La baisse de la fermeté s'accompagne d'une baisse des teneurs en amidon (18% => 0,1%), en pectine (1,9 => 0,5%), en cellulose (2% => 0,9%) et en hémicellulose (0,8% => 0,2%) (Jha et al., 2010; Yashoda et al., 2006). L'activité des enzymes responsables de ces changements est accentuée par l'augmentation de la température de maturation, avec un ramollissement des mangues plus marqué aux températures élevées (Hossain et al., 2014; Narain et al., 1997). Cette sensibilité à la température permet aux exportateurs de maintenir la fermeté durant le transport et la distribution chez les détaillants en conservant les mangues de stade vert-mature entre 8 °C et 13 °C (en fonction de la variété et de la durée de stockage requise), puis à les faire mûrir entre 20 °C et 23 °C une fois à destination pour la vente en frais (Sivakumar et al., 2011).

II.4.3 Impact des conditions de maturation sur le gout et l'arôme des mangues

A la récolte, les mangues de maturité physiologique ont de très faibles teneurs en sucre solubles, en composés volatils et une acidité très élevée. Dans certaines zones comme à la Réunion, les mangues vertes sont utilisées en accompagnement comme condiment des plats salés (rougail) ou en salades mais ne sont pas destinées à la consommation de bouche comme dessert. A la fin de la croissance, le potentiel qualité peut se définir comme la quantité de métabolites stockée au cours de la croissance tels que les sucres (simples et complexes), les acides organiques, les arômes et leurs précurseurs tels que les acides gras (Lalel et al., 2004; Nordey, 2014). Des travaux récents montrent que ce potentiel peut être évalué par SPIR (Nordey et al., 2019) ou par densimétrie (Hor et al., 2020a). La maîtrise des conditions de maturation est essentielle pour obtenir des mangues développant tout leur potentiel organoleptique par la transformation de l'amidon en sucres simples (de 7% à 20% de TSS), la baisse de l'acidité (pH de 2,8 à 5,1, baisse de l'acide citrique qui est majoritaire de 2,5% à 0,2% en base humide) et l'augmentation de la concentration en composés volatiles rendant les fruits plus doux, attractifs et appréciés d'un point de vue sensoriel (Baloch and Bibi, 2012; Lalel et al., 2003; Malundo et al., 2001; Yashoda et al., 2006). L'expression et l'activité des enzymes responsables des transformations biochimiques les rendent plus ou moins complètes et dépendent en grande partie de la température de maturation (Hossain et al., 2014).

Pour la majorité des variétés de mangue, les températures élevées de maturation entraînent une augmentation du °Brix, une baisse plus accrue de l'acidité et l'augmentation de la concentration en composés volatiles (Baloch and Bibi, 2012) du fait de l'augmentation associée de l'activité enzymatique.

III. Conclusions de la synthèse bibliographique et démarche de la thèse

Les producteurs de mangue sèche naturelle ne peuvent ni l'enrichir en sucres, ni utiliser quelque antioxydant ou conservateur que ce soit. Ils sont privés de possibilités de formulation qui, dans bien d'autres produits, limitent la dégradation de la couleur et augmente la stabilité microbiologique, autorisant les produits traités une conservabilité à des teneurs en eau élevées et par conséquent une meilleure texture en bouche. Le recours à ces produits de préservation étant proscrit, les mangues sèches naturelles brunissent au cours du séchage et de la conservation (passage de l'orange vers du brun-marron). La couleur initiale dépend de la teneur en caroténoïdes mais le séchage la modifie par le brunissement enzymatique, la réaction de Maillard et l'oxydation des caroténoïdes. Le séchage entraîne une diminution de la teneur en composés volatils (jusqu'à 59%) et une apparition d'autres composés (Bonneau et al., 2016). Avec des effets moins importants sur la qualité, il peut aussi réduire la teneur de certains acides organiques et modifier la balance initiale entre les sucres par l'hydrolyse du saccharose. Après le séchage, une conservation au froid positif, dans un emballage sous vide et opaque permettent d'éviter le contact avec la lumière, la réhydratation des tranches et ainsi une bonne conservation de l'état des tranches de mangues séchées. Toutefois, ces méthodes garantissent bien la stabilité du produit fini après séchage et non la qualité intrinsèque des mangues séchées qui dépend des paramètres de séchage et des caractéristiques de la matière première.

La qualité de la matière première dépend en premier lieu de la variété qui est un critère de choix de caractéristiques spécifiques attendues, puis de la conduite du pré-récolte et du post-récolte. La croissance sur l'arbre dans de bonnes conditions (apport carboné, hydrique et azoté) permet à la mangue de stocker suffisamment de métabolites lorsqu'elle arrive au stade de maturité physiologique pour bien exprimer le potentiel de la variété. La maturation dans des conditions optimales permet d'activer les mécanismes phytohormonaux et enzymatiques impliqués dans les changements biochimiques lors de la maturation. Ils conduisent à la synthèse optimale des composés impliqués dans l'appréciation sensorielle (couleur, sucre/acide, arômes).

Face à la difficulté d'avoir un contrôle de la variabilité des fruits, les études sur l'effet des paramètres du pré-récolte et du post-récolte sur la qualité des produits transformés sont complexes à mener. Comme présenté dans l'étude bibliographique, ces paramètres ont un effet sur les proportions des composés de la mangue qui sont d'une part impliqués dans la qualité organoleptique des mangues fraîches et sèches, et d'autre part impliqués dans certaines réactions de dégradation lors du séchage.

Les critères de qualité qui ont été retenus pour cette étude sont la couleur, principal critère d'achat des mangues séchées et défaut des mangues sèches naturelles de par son hétérogénéité et sa dégradation plus rapide par rapport aux mangues séchées sulfitées (confites/conventionnelles), la teneur en sucres et l'acidité titrable, indicateurs reliés à l'appréciation sensorielle des mangues. Nous nous appuyerons sur l'hypothèse que l'hétérogénéité des produits finis après un séchage homogène provient de l'hétérogénéité de la matière première. Ainsi en créant une variabilité « contrôlée » à travers des niveaux différents de facteurs pré-post-récolte précis, il est envisagé d'en quantifier leurs effets sur la composition des mangues fraîches et de déceler les facteurs qui induisent un changement de comportement lors du séchage, seuls ou en interaction avec d'autres facteurs. Ceci pourrait ainsi apporter des connaissances sur l'origine de la variabilité des mangues séchées, décrite par les distributeurs qui souhaitent répondre aux attentes des consommateurs d'avoir une qualité du produit final constante.

Le constat de la complexité technique en amont de la filière établi, joint à une analyse des facteurs susceptibles d'être pilotés en pays en voie de développement, principaux producteurs de mangues sèches naturelles, a conduit à une sélection de facteurs pour nos études : variété, stade de maturité à la récolte, avancement dans la saison, température et durée de maturation.

En plus du séchage « standard », réputé conduire à des mangues sèches naturelles de bonne qualité, une étude particulière a été mise en place pour étudier les défauts de qualité induits par des conditions de séchage moins-optimales, comme rencontrées dans certaines unités. En plus de la quantification de la moyenne des défauts induits, le dispositif expérimental a été conçu pour faire ressortir la dépendance des défauts à la maturité des mangues fraîches travaillées, avec possiblement des effets positifs dans certains cas. Ainsi, un début de séchage peu efficace est-il susceptible de provoquer une maturation accélérée de mangues pas suffisamment mûres, en imposant des conditions chaudes et humides favorables aux réactions ? A l'inverse, l'inactivation des enzymes de mangues trop mûres va-t-elle avoir un effet plus important que l'augmentation de la vitesse de brunissement ?

IV. Plan du manuscrit

Ce manuscrit est organisé en deux parties.

Le **chapitre 1** de la **première partie** présente l'effet des facteurs pré-récolte et post-récolte sur les modifications de couleur des mangues lors d'un séchage, toujours le même, bien adapté pour les tranches de fruits. Cette étude évalue comment les conditions appliquées au verger puis en stockage - maturation influencent les relations entre la variation de couleur durant le séchage. Le **chapitre 2** étudie les possibilités par le séchage de corriger des défauts qualitatifs présents sur des mangues fraîches. Différents diagrammes de séchage ont été étudiés à cet effet.

Avec le rôle faible d'un séchage réalisé dans des conditions optimales dans la formation de la qualité des mangues sèches naturelles, la **deuxième partie** s'intéresse alors à l'élaboration de la qualité des mangues **fraîches** en fonction des conditions de pré-récolte et de stockage maturation (**premier chapitre**) puis à l'évolution de la qualité dans le cas où des mangues mûres sont mises en conservation à 12 °C, cette conservation visant à homogénéiser les lots d'approvisionnement et faciliter l'organisation du fonctionnement d'une unité (**second chapitre**).

**Première partie : Facteurs influençant la qualité des
mangues sèches**

Chapitre I. Impact of pre- and post-harvest on color changes during convective drying of mangoes

Objectifs

La couleur est le principal critère d'achat des mangues séchées et le principal inconvénient qualitatif des mangues sèches naturelles de par son hétérogénéité et sa dégradation plus rapide par rapport aux mangues séchées sulfitées (confites/conventionnelles). Au-delà des ajouts de substances chimiques, la majorité des études scientifiques se concentrent sur des procédés alternatifs énergivores, très coûteux, difficilement applicables dans le contexte subsaharien.

Ici, il s'agit d'évaluer par une approche expérimentale, l'influence de paramètres agronomiques, de stockage maturation pour tenter de déceler l'origine des dégradations de la couleur lors du séchage. Pour ce faire, la variété, le stade de maturité à la récolte et l'avancement dans la saison ont été les paramètres pré-récolte étudiés, la température et la durée de maturation comme paramètres post-récolte. Les mangues issues de très différentes combinaisons ont été séchées selon un diagramme unique (60°C / 30 % HR / 1,5 m/s pendant 5 heures) et les relations entre la couleur avant et après séchage établies en fonction des paramètres étudiés, à l'aide de modèles mixtes d'analyse de covariance.

Cette partie a été publiée sous forme d'article scientifique dans le journal ***Foods*** intitulé « Impact of pre- and post-harvest on color changes during convective drying of mangoes ».

Résultats marquants

- Moduler les conditions pré-récolte et post-récolte a permis d'obtenir une large gamme de couleurs de pulpe de mangue.
- La couleur des mangues fraîches a été bien maintenue par le séchage à 60 °C, 30% HR, pendant 5h quelle que soit leur origine.
- Le brunissement pendant le séchage n'a pas été affecté par les facteurs pré et post-récolte.
- La température de mûrissement a eu un effet significatif sur les changements de H° et de C* pendant le séchage.
- La couleur de la pulpe de mangue fraîche a eu un effet dominant sur la couleur des mangues séchées.

Article

Impact of Preharvest and Postharvest on Color Changes during Convective Drying of Mangoes

Alioune Diop ^{1,2,3,4,*}, Jean-Michel Méot ^{3,4}, Mathieu Léchaudel ^{4,5}, Frédéric Chiroleu ^{4,6},
Nafissatou Diop Ndiaye ², Christian Mertz ^{2,3,4}, Mady Cissé ⁷ and Marc Chillet ^{1,4}

¹ CIRAD, UMR QualiSud, 7, Chemin de l'IRAT, 97410 Saint-Pierre, La Réunion, France; marc.chillet@cirad.fr

² ITA, Route des Pères Maristes, Hann-Dakar BP-2765, Senegal; ndiop@ita.sn (N.D.N.); christian.mertz@cirad.fr (C.M.)

³ CIRAD, UMR QualiSud, 34398 Montpellier, France; jean-michel.meot@cirad.fr

⁴ QualiSud, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier SupAgro, Univ d'Avignon, Univ de La Réunion, 34398 Montpellier, France; mathieu.lechaudel@cirad.fr (M.L.); frederic.chiroleu@cirad.fr (F.C.)

⁵ CIRAD, UMR QualiSud, 97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France

⁶ CIRAD, UMR PVBMT, 7 Chemin de l'IRAT, 97410 Saint-Pierre, La Réunion, France

⁷ Laboratoire d'Electrochimie et des Procédés Membranaires (LEPM), ESP-UCAD, Dakar 10200, Senegal; mady.cisse@ucad.edu.sn

* Correspondence: aliounediop23@gmail.com or alioune.diop@cirad.fr; Tel.: +22-177-2047-374



Citation: Diop, A.; Méot, J.-M.; Léchaudel, M.; Chiroleu, F.; Ndiaye, N.D.; Mertz, C.; Cissé, M.; Chillet, M. Impact of Preharvest and Postharvest on Color Changes during Convective Drying of Mangoes. *Foods* **2021**, *10*, 490. <https://doi.org/10.3390/foods10030490>

Academic Editor: Min Zhang

Received: 20 January 2021

Accepted: 22 February 2021

Published: 25 February 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the impact of the harvest stage, ripening conditions and maturity on color changes of cv. 'Cogshall' and cv. 'Kent' variety mangoes during drying. A total of four harvests were undertaken, and the fruits were ripened at 20 and 35 °C for five different ripening times at each temperature. At each ripening time, mangoes were dried at 60 °C/30% RH/1.5 m/s for 5 h. A wide physico-chemical and color variability of fresh and dry pulp was created. The relationships according to the L*, H* and C* coordinates were established using mixed covariance regression models in relation to the above pre- and postharvest (preprocess) parameters. According to the L* coordinate results, browning during drying was not affected by the preprocess parameters. However, dried slices from mangoes ripened at 35 °C exhibited better retention of the initial chroma, and had a greater decrease in hue than dried slices from mangoes ripened at 20 °C. However, fresh mango color, successfully managed by the pre- and postharvest conditions, had more impact on dried mango color than the studied parameters. The preprocess parameters were effective levers for improving fresh mango color, and consequently dried mango color.

Keywords: mango; maturity stage; ripening temperature; dried mangoes; color; quality

I. Introduction

Drying represents one of the most common unit operations in the agri-food industry, for product stabilization. It greatly reduces the weight of the products, lowers water activity and slows microbe growth, as well as chemical and bio-chemical reactions. Hence, long storage and transport can be provided at a lower energy cost. Drying also alters the physical chemistry of foods, by causing changes in the mechanical properties [1], aromatic properties [2,3], nutritional properties [4,5], and color properties [6–9]. Color is generally the top purchase criterion for fruit [10], and for dried mangoes [11] in particular. Natural dried mangoes, without any added sugar or sulfites, are regarded as more dietetic and having a stronger taste [11]. The absence of added antioxidants means that they are prone to browning during preparation, drying and storage. Browning causes a color change in the mango slices from yellow-orange to brown-black, and when over-developed leads to rejection by consumers.

The main fruit browning reactions are both enzymatic and nonenzymatic [12]. Enzymatic browning of mangoes is caused by oxidation of phenolic compounds by polyphenol-oxidases (PPOs) and peroxidases (PODs). This reaction triggers a succession of other

reactions, leading to the formation of brown pigments known as melanins [13]. The Maillard reaction, one of the main nonenzymatic browning reactions, is a set of processes between reducing sugars and amino acids, leading to the formation of brown-colored melanoidins [14]. The breakdown of carotenoids, due to the high drying temperatures and oxidative losses due to convective drying [15,16], could also contribute to nonenzymatic browning of mangoes [17].

The agronomic, storage and ripening conditions affect the concentration of browning reaction substrates and of the enzymes catalyzing them. The polyphenols content and PPO activity depends on the variety [18] and increases with mango degree of maturity [19–21]. The carotenoids content varies according to the variety [22] and the harvest stage, and increases with the ripening temperature and mango degree of maturity [23,24]. The reducing sugars content increases with maturity [25], but varies according to variety [25,26], agronomic conditions [27] and maturity stage at harvest [28]. These major variations can have a significant effect on the intensity of the various types of browning, and on the color of the product reaching the consumer.

Several authors have studied innovative alternative processes to convective drying, to significantly reduce the browning reactions: conductive multistage and freeze drying [8], or drying in combination with dual-stage sugar substitution pretreatment [29], or combined hot-air and microwave-vacuum drying [30], assisted by ultrasound [31], low-pressure superheated steam and vacuum drying [17], but without taking into account the pre- and postharvest practices employed on the mangoes.

Knowledge of the effects of preharvest (cropping conditions including irrigation, fruit load and maturity stage at harvest) and postharvest (storage and ripening conditions) on mango pulp color has been little developed [32,33]—and knowledge of the effects of the same factors on color alterations during drying even less so. This type of study has faced the great difficulty or even inability to precisely measure mango maturity, due to the “biological variability” between mangoes from the same batch, however well they may have been selected [34].

The control of color defects is present in the production units as well as in the commercial transactions. It is practiced from the visual comparison of products with reference color charts to instrumental analysis. Chromametry is particularly suitable for measuring mango color as perceived by consumers, which is correlated with quality attributes but also the defects present [35]. A decrease in L^* , a^* and b^* values and an increase in browning index (BI) and total color change (TCC) were associated with deterioration of fruit color during drying [36–38]. These color parameters were also used by Zheng [39] to develop a method for the automatic detection of the degree of browning of mangoes with an accuracy of up to 100%. Sturm et al. [40] associated artificial vision system with colorimetric parameters for in-line measurement of color changes ($R > 0.9$). For fresh mango pulp, strong correlations were obtained between the chromatic data (especially the hue angle and a^*) and the total carotenoids and beta-carotene content of the pulp [4,15,17,41].

This study was conducted to identify the pre- and postharvest parameters causing color changes during drying. Hence, wide variation in fresh mango pulp composition and color was generated by varying the maturity stage at harvest, the ripening temperatures and times, across two varieties. The relationships between product color before and after drying were analyzed by mixed covariance regression models, taking into account the pre- and postharvest factors studied.

II. Materials and Methods

II.1 Plant Materials

The experiments were performed on mangoes (*Mangifera indica* L.) of the cv. Cogshall variety in Reunion, and of the cv. Kent variety in Senegal. Two harvests were carried out on Cirad’s experimental orchard at Saint-Pierre (21°19′/21.8° S 55°29′/17.9° E), at the green-mature stage at the start of the harvesting season (early harvest) for Batch 1, and at the yellow-point stage in the middle of the season (late harvest) for Batch 2. Two other

harvests in Senegal, on Mr. MBACKE's orchard, Mboro (15°09'37.6" N 16°52'13.5" W), at the green-mature stage at the start of the harvesting season (early harvest) for Batch 3, and at the peak stage (late harvest) for Batch 4. For the Cogshall variety, the maturity stage at harvest was measured using an FMS2 portable fluorimeter (Hansatech, King's Lynn, UK) on the mango apices [42]. Mangoes with a maximum fluorescence of between 1050 and 1175 correspond to the green-mature stage, while those with a fluorescence of between 750 and 950 correspond to the yellow-point stage [42]. For the Kent variety, the mangoes were harvested by an expert picker, who selected the appropriate mangoes, according to a set of specifications for cargo export, at the green-mature stage. The Batch factor represents the combinations between season time and the maturity stage at harvest, since this space has not been fully explored. On the one hand, the harvest time is a potentially nonlinear variable which we could not reduce to make homogeneous between the two series. On the other hand, the evaluation methods for maturity stage at harvest were different for each variety. Due to insufficient control of these two factors, the four combinations tested were treated as four categories of the same factor.

II.2 Mango Ripening and Drying

For each harvest, the mangoes validating the maturity stage at harvest criteria were stored at 20 and 35 °C. Mangoes were taken out after different ripening times. These times were adjusted according to the development (color, texture, and odor) of the fruit, to carry out five withdrawals, the last of which corresponded to very ripe mangoes, on the threshold for fresh consumption. For each withdrawal, five mangoes per ripening temperature category were washed in chlorinated water (0.6% sodium hypochlorite) for 5 min, and rinsed three times in fresh water. After washing, the mangoes were peeled and then sliced using a stainless-steel mandolin slicer 4 mm thick. Four slices from each mango were sampled and dried with a forced convection electric dryer, at 60 °C/30% RH for 5 h with an average air speed of 1 m/s. After sampling four slices, the remainder of the pulp of each mango was ground separately in liquid nitrogen, and then stored at 80 °C for the physico-chemical analyses.

II.3 Quality Analysis (Color, Total Soluble Solids, pH, Titratable Acidity)

Twelve color measurements were taken using a chromameter (Minolta CR-400, Tokyo, Japan) on each mango. Three measurements were taken on each mango slice (four slices per mango), before and after drying, on the main axis of the slice; one on the stalk area, one on the central area, and one on the apex area. They were collected in the color space CIE L*, a*, b*. L* is the luminance expressed on a scale ranging from black to white, a* from green to red and b* from blue to yellow. To comment on the color values, the colorimetric space L*, C* (Chroma) and H* (hue angle) was used with the conversion formulae Equations (1) and (2).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

$$H^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (2)$$

(2)

The soluble sugars content (TSS) was measured on the defrosted pulp with a portable refractometer (PAL-α, Atago, Tokyo, Japan). The pH and titratable acidity (meq/mL) were measured on the defrosted pulp using an automatic titrator (TitroLine, Schott Instruments, Mainz, Germany). The titration was carried out with a 0.05 N NaOH solution.

II.4 Statistical analyses

The statistical analyses were carried out with the R software [43]. For each mango, the average of the 12 color measurements was calculated before performing the analyses on the data set. A mixed covariance regression model was built to analyze the effect of the pre- and postharvest factors modulating the relationship between the colorimetric indices (L*, C* and H*) measured on fresh products (independent quantitative variable)

and those measured on dry products (dependent quantitative variable). The variety, temperature and their interaction were integrated as fixed effects, and the Batch factor as a random effect, since the harvesters, maturity measurement methods for each variety, and the maturity indicators, varied. Mixed models were then built for each variety with ripening temperature in fixed effect, and the Batch factor in random effect. A deviance test at 5% threshold was performed to test both fixed effects (with Restricted Maximum Likelihood: REML) and random effects on nested models (with Maximum Likelihood: ML). The packages lme4 [44] and MASS [45] were used to build the mixed models, and to compare the models.

III. Results and Discussion

III.1 *Changes in Quality Criteria of Raw Material According to Variety, Harvest Stage, Ripening Time, and Storage Temperatures*

The physico-chemical data of cv. Cogshall and cv. Kent variety mangoes on harvesting and after ripening are presented in (Table 1). The mean mass of the mangoes increased with harvest stage for each variety (significant for Kent). The Kent variety mangoes were on average larger-sized (approximately 600 g) than the Cogshall variety mangoes (447 g), regardless of harvest stage; this agrees with the work of Lebrun et al. [46]. For the harvests at the green-mature stage, there was no significant difference between the total soluble solids content of the two varieties. Our data confirm the results found by Léchaudel and Joas [47], which demonstrate that the Cogshall variety mangoes harvested before 115 days after blooming (DAB corresponding to the green-mature stage) have a total soluble solids content of less than 10. After ripening, the maximum °Brix values (23.5) were attained by the Kent variety. For each variety, the maximum Brix values after ripening were attained by mangoes harvested at later maturity stages (Batches 2 and 4). These mangoes accumulated more metabolites and had a higher quality potential [47]. Batch 2 mangoes appear to have not only accumulated more starch than those from the first one, but their climacteric crisis was triggered before the harvest, causing conversion of starch into soluble sugars and a reduction in citric acid content [47], as indicated by the higher soluble dry extract values and lower titratable acidity values compared to Batch 1.

The mango ripening time to attain a stage corresponding to a very ripe fruit was a direct function of the storage temperature, regardless of the variety and harvest stage (Table 2). The ripening time required to attain this maturity stage decreased with increasing temperature, by approximately 25–30% for a change from 20 to 35 °C. Several studies have shown that increasing ripening temperature leads to a reduction in ripening time [23,48]. The maximum ripening time for the Kent variety was longer than for the Cogshall variety, regardless of the harvest stage and storage temperature studied. This variety, renowned for its exportability [49], confirmed its long potential postharvest lifetime. The ripening time is shorter when the mangoes are harvested at a later stage. In the case of fruit harvested at the green-mature stage, various successive phases have been described; a preclimacteric phase, then the climacteric phase which leads to ripening of the mango [50]. This preclimacteric phase becomes shorter or even nonexistent as the maturity stage at harvest becomes more advanced.

Table 1. Physico-chemical characteristics at harvest and after ripening of the four mango batches.

Variety		Cogshall				Kent			
Harvest Location		Saint-Pierre, Réunion, France				Mboro, Senegal			
Batch Number		Batch 1		Batch 2		Batch 3		Batch 4	
Harvest date		21 December 2018		1 January 2019		20 June 2019		22 July 2019	
Maturity stage at harvest		Green-Mature (1)		Yellow-point (1)		Green-Mature (2)		Green-Mature (2)	
Harvest stage		Early harvest		Late harvest		Early harvest		Late harvest	
Number of mangoes: at harvest/ripening		6/41		4/47		7/75		7/76	
Mass at harvest (g)		446 (7.3) c		453 (7.5) c		547 (8.1) b		652 (12.7) a	
TSS (°Brix)	At harvest	8.4 (0.5) b		13.7 (2.4) a		6.0 (0.2) b		6.8 (0.1) b	
	Ripening	16.5 (0.3) b		18.2 (0.2) a		14.7 (0.3) c		17 (0.5) ab	
pH	At harvest	3.0 (0.04) b		3.5 (0.14) a		-		-	
	Ripening	3.7 (0.2) b		4.3 (0.2) a		-		-	
TA (meq/100 g)	At harvest	29.5 (1.6) a		15.1 (1.6) b		-		-	
	Ripening	11.8 (2.8) a		6.1 (1.4) b		-		-	
Ripening	Min/max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	TSS (°Brix)	10.7	19.5	14.3	20.7	8.4	19.2	8.1	23.5
	pH	2.85	4.7	3.51	5.46	-	-	-	-
	TA (meq/100 g)	3.8	30.2	2.2	15.2	-	-	-	-

(1) Evaluated using fluorimeter; (2) Evaluated by a professional picker. Values in bracket next to means represent the standard error. The various letters indicate the significant differences ($p \leq 0.05$) on the means by physico-chemical variable by stage (pairwise comparison test or Fisher Snedecor test).

Table 2. Ripening time according to variety, harvest stage and ripening temperatures.

Varieties	Batch Numbers	Ripening Temperature (°C)/Sampling Days	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Cogshall	1	20 °C						x		x		x		x*			
		35 °C				x	x	x	x	x*							
	2	20 °C				x	x	x	x	x*							
		35 °C	x	x	x	x	x*										
Kent	3	20 °C			x			x		x		x			x		x*
		35 °C			x		x		x		x		x*				
	4	20 °C			x			x		x	x			x		x*	
		35 °C			x		x	x	x	x*							

x* represent the end of the ripening process for each modality (overripe mangoes obtained).

III.2 Changes in Color Characteristics of Dried Mango Slices According to Variety, Harvest Stage, Ripening Time, and Storage Temperatures

As described above for the physico-chemical compositions of fresh mangoes (Table 1), the factor combinations generated wide variation in the color of the dried mango slices (Figure 1). Figure 1a,b are the representations of $L^* = f(H^*)$ and $C^* = f(H^*)$, respectively, measured on the dried mango slices from the cv. Cogshall and cv. Kent varieties, and from the different pre- and postharvest factors studied. Changes in these color components varied according to variety, maturity stage at harvest and the ripening temperature.

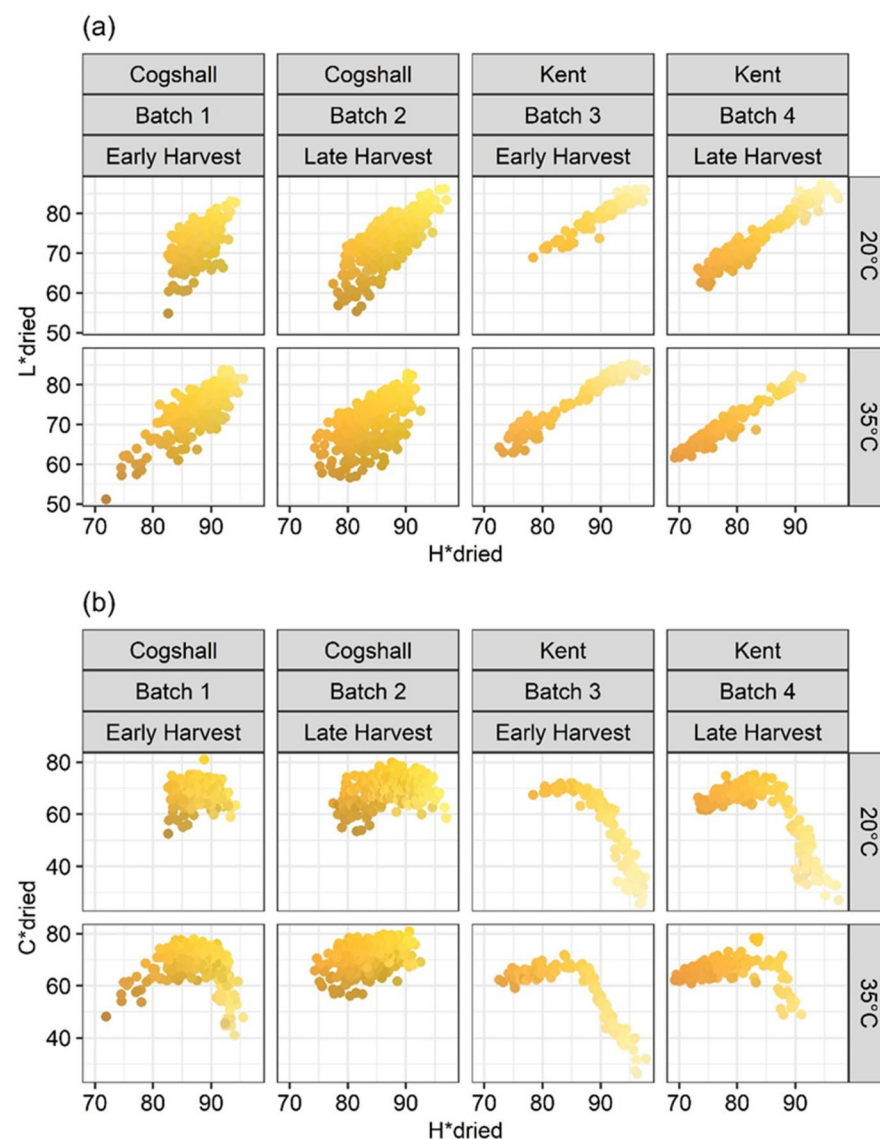


Figure 1. Relationships between L^* and H^* (a) and C^* and H^* (b) from colour measurements on dried mangoes according to varieties, harvest stages, ripening temperatures, and maturity. The colour of the points was obtained by converting L^* , H^* and C^* coordinates into RGB.

The distributions of the dots derived from Batches 1 and 2 (Figure 1a,b for cv. Cogshall) exhibit high dispersions compared to Batches 3 and 4 (cv. Kent). This could be due to the greater internal heterogeneity of Cogshall mangoes. Nordey et al. [51] showed that whatever the maturity stage, there were significant color variations in the pulp of the same mango, according to the area where the measurement was taken. In our study, this difference in dispersion of the color indices was found only between the different varieties, but was not affected by the harvest stage, ripening temperature or ripening time.

The L^* and H^* components were clearly linearly linked ($R^2 = 0.78$, $p < 2 \times 10^{-16}$), regardless of preharvest and postharvest conditions (Figure 1a). The same positive correlation was obtained by Gill et al. [32]. Component C^* had a typical behavior. As a result, the relationships between C^* and H^* described crescent shapes, regardless of pre- and postharvest conditions (Figure 1a). These same patterns of relationships between C^* and L^* (Figure S1) were observed because of the linear relationship between L^* and H^* . The color varies from a yellow-pale green color (i.e., $L^* \sim 85$; C^* : Cogshall ~ 50 , Kent ~ 30 ; $H^* 95^\circ$) to an orange-chestnut to darker chestnut (i.e., L^* : $\sim$ Cogshall ~ 55 , Kent ~ 64 ; C^* : Cogshall 80, Kent ~ 75 ; H^* : $\sim$ Cogshall 77° , Kent $\sim 73^\circ$, (Figure 1a)). The same distribution shape as Figure 1b was obtained by Penchaiya et al. [34], linking a^* and b^* , which were, respectively, positively correlated with H^* and with C^* . Each variety had a specific characteristic distribution. For Kent, in the first phase where the dried mangoes were derived from immature mangoes ($H^* > 95^\circ$, $L^* > 85$ and $C^* < 50$; Figure 1a,b), C^* underwent a big increase, while H^* and L^* exhibited little variation, remaining high. The yellow color became more saturated, while H^* and L^* did not see much reduction, with a slight decrease in green to green-yellow. Thereafter, C^* saw very little reduction, while H^* and L^* saw big falls, changing from yellow to dark orange. These color change mechanisms during ripening were the same as for the varieties cv. Langra [32], cv. Manila and cv. Ataulfo [52], with nearly the same colorimetric index values throughout ripening. The first phase was shorter for the Cogshall variety than for the Kent variety. The ripening and color changes were faster for cv. Cogshall than cv. Kent (Table 1). Hence this first change phase from light green to yellow–dark yellow was not detected due to lack of sampling at the very start of ripening, especially for Batch 1, ripened at 20°C (day 7). Regardless of the variety, a late harvest or ripening at 35°C , or these two factors in combination, yielded lower H^* and L^* and higher C^* . The color of these dried pulps appeared to be more orange and purer, which could be appealing to consumers. According to Baloch and Bibi [23], mangoes harvested at an advanced stage and ripened at high temperature have a more attractive color and better sensory rating. The color of the dried Kent slices harvested late and ripened at 35°C was more orange, characterized by a lower H^* min (72°), less intense, with a lower C^* max (75) and less dull, with a higher L^* min (64) than for Cogshall (with H^* min, C^* min, and L^* min of 76° , 86, 54, respectively). Ripening at $33 \pm 2^\circ\text{C}$ obtained dried mangoes with lower H^* values, leading to higher carotenoid and sensory quality contents for Nam Dokmai [4].

III.3 Relationships between Color Characteristics of Fresh and Dried Mango Slices According to Variety, Harvest Stage, Ripening Time, and Storage Temperatures

Figures 2–4 represent the relationships between the colorimetric indices measured on the dried slices (L^* dried, H^* dried, C^* dried) and those measured on the same slices when fresh (L^* fresh, H^* fresh, C^* fresh), according to various pre- and postharvest factors. All the points are close to the first bisector, which indicates that drying makes little difference to the color of the mango slices, regardless of their history before drying. However, the slopes and intercepts exhibit some variations. The results of the mixed model can be used to test if the variety, harvest stage and ripening temperature significantly affect the color changes caused by drying (Table 3). The factors significantly affecting the relationship parameters vary according to the index studied.

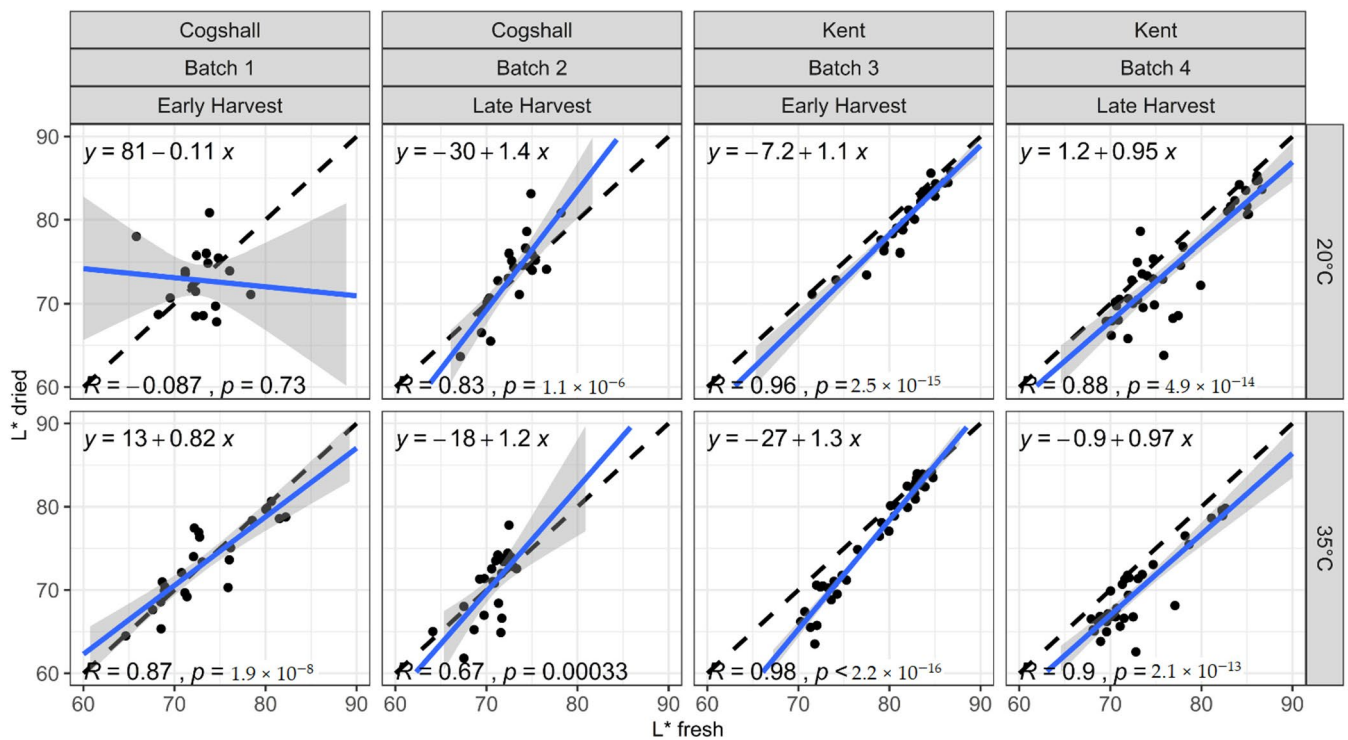


Figure 2. L^* measured on dried slices as a function of the same indices measured on the same slices before drying. Black dashed line: first bisector; solid blue line with grey envelope: L^* dried linear regression as a function of L^* fresh, and 95% confidence interval.

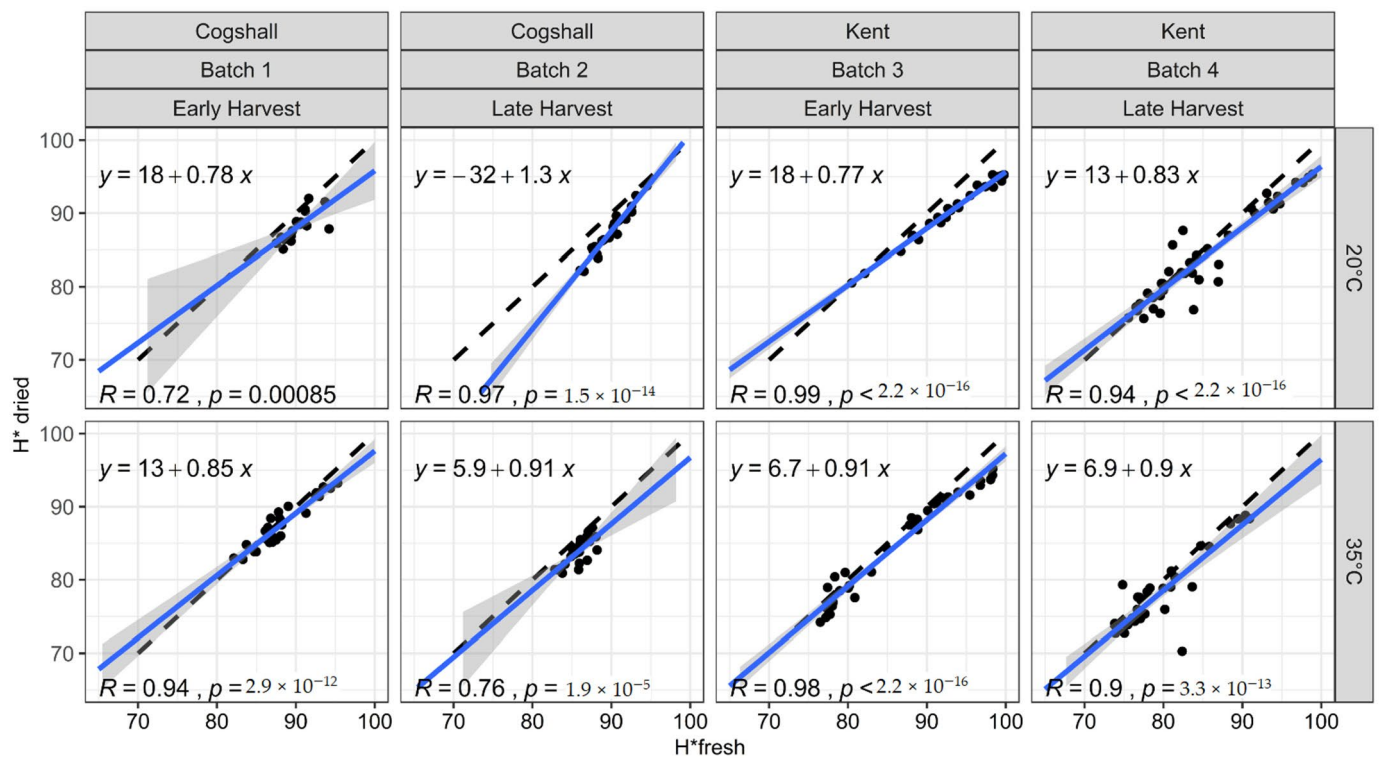


Figure 3. H^* measured on dried slices as a function of the same indices measured on the same slices before drying. Black dashed line: first bisector; solid blue line with grey envelope: H^* dried linear regression as a function of H^* fresh, and 95% confidence interval.

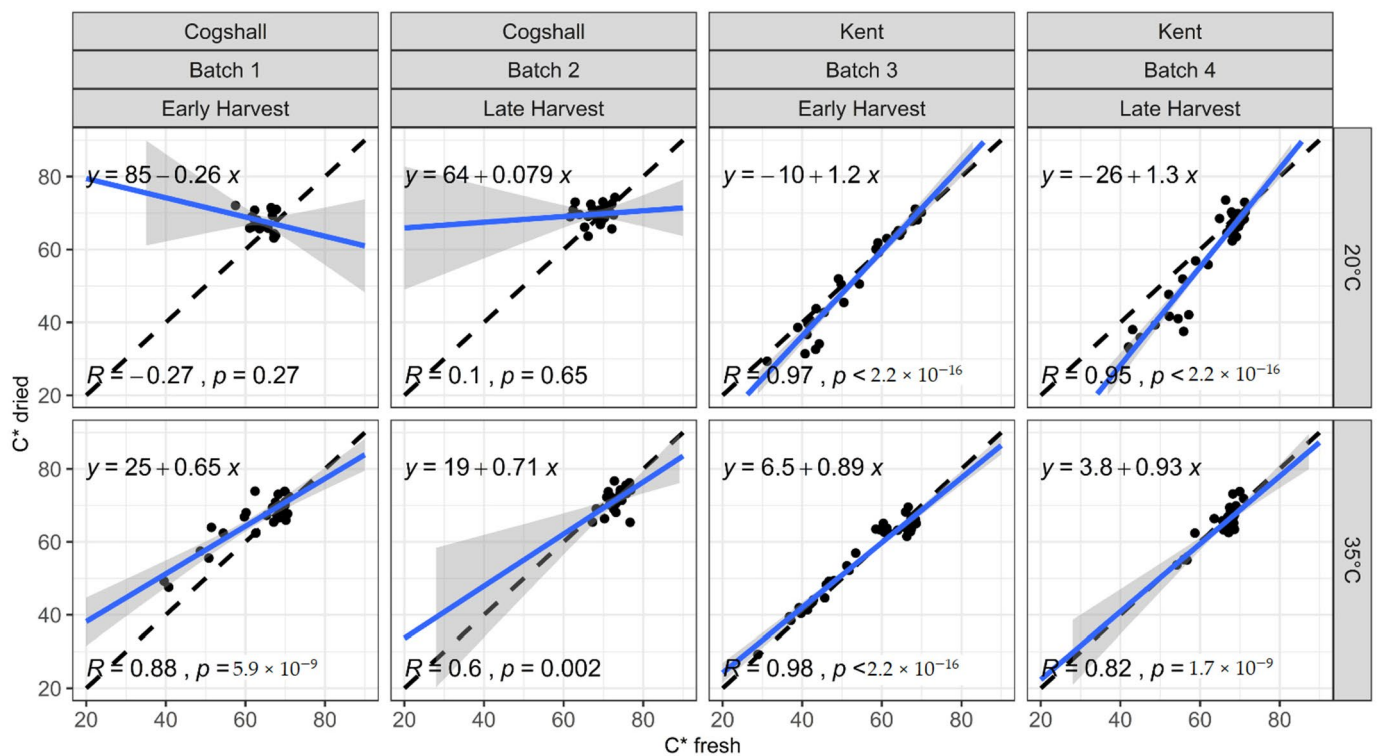


Figure 4. C^* measured on dried slices as a function of the same indices measured on the same slices before drying. Black dashed line: first bisector; solid blue line with grey envelope: C^* dried linear regression as a function of C^* fresh, and 95% confidence interval.

Table 3. Impact of pre- and postharvest parameters on the slopes and intercepts of the regression lines.

General Mixed Model (L*/H*/C*Fresh)		L*Dried <2 × 10 ⁻¹⁶ ***	H*Dried <2 × 10 ⁻¹⁶ ***	C*Dried <2 × 10 ⁻¹⁶ ***
Varieties	Slope	0.04 *	0.09	3 × 10 ⁻⁴ ***
	Intercept	9 × 10 ⁻¹³ ***	0.39	0.67
Ripening Temperature	Slope	0.04 *	3 × 10 ⁻³ **	0.007 **
	Intercept	0.3	0.7	0.06
Interaction Temperature x Variety	Slope	0.6	0.04 *	2 × 10 ⁻⁶ ***
	Intercept	0.4	0.03 *	0.09
Batches		0.003 **	0.2	0.004 **
Mixed Model Per Variety (L*/H*/C*Fresh)		L*Dried <2 × 10 ⁻¹⁶ ***	H*Dried <2 × 10 ⁻¹⁶ ***	C*Dried <2 × 10 ⁻¹⁶ ***
cv. Cogshall	Ripening Temperature	Slope	0.1	2 × 10 ⁻⁴ ***
		Intercept	0.8	0.2
	Batches	0.01 *	0.005 **	1
cv. Kent	Ripening Temperature	Slope	0.05	2 × 10 ⁻⁵ ***
		Intercept	0.4	3 × 10 ⁻³ ***
	Batches	0.08	0.98	0.009 **

*** Significant at 0.1% threshold; ** significant at 1% threshold; * significant at 5% threshold.

III.3.1 Luminance (L^*)

Figure 2 represents the lightness L^* of the dried slices as a function of that of the fresh slices, according to the various factors studied. The deviance tests with a threshold of 5% on the mixed models show that the variety and ripening temperature have a very low-significance effect ($p = 0.04$) on the slopes of the relationship between the L^* of the dried slices and that of the fresh slices. Conversely, the variety has a very highly significant effect ($p = 9 \times 10^{-13}$) on the intercepts of these relationships. This is primarily due to Batch 1, ripened at 20 °C, as is confirmed by the highly significant effect of the Batch factor ($p = 0.003$) in the deviance test on embedded models. The first late sampling for this category day 7, (Table 2) meant that high L^* values were not obtained. Lower lightness values were obtained for ripening at 35 °C, hence the increase in the domain of variation of L^* improved the prediction quality. The increase in ripening temperature obtained lower L^* values [32]. Consequently, the points from Batch 1 (20 °C) form a cloud grouped at intermediate L^* values (Figure 2); the prediction equation is not suitable for this category, and disrupts the overall model. The result of the mixed regression model for each variety confirms this explanation, since the Batch factor has a significant influence only on the Cogshall variety ($p = 0.01$). For the Kent variety, no parameter has any effect on changes in lightness during drying. The effect on lightness is practically the same regardless of the process followed for drying as implemented.

The formation of brown compounds from the browning mechanisms during drying dulls the fruit slices, and lowers L^* [53,54]. The results of Corzo and Álvarez [55] point to a slope of more than 1 for the curves of L^* dried = $f(L^*$ fresh), i.e., a greater fall in luminance during drying for ripe fresh products characterized by low L^* , comparative to immature fresh products with high L^* . During ripening, increases in the polyphenols content [21] and PPO activity [19] on the one hand, as well as the reducing sugars content [25] and proteins content [24] on the other hand, should lead to ripe mangoes with a greater browning tendency because of a larger quantity of substrates and enzymes favoring enzymatic browning reactions and the Maillard reaction. Our results on the effect of pre- and postharvest on luminance changes during drying are consistent, since the drying conditions used were unfavorable for the development of enzymatic browning and the Maillard reaction. The constant-rate drying phase was short, with a product surface temperature of around 39 °C, a wet air temperature of 60 °C and 30% RH.

III.3.2 Hue Angle (H^*)

Figure 3 represents the hue of the dried slices as a function of the hue of the fresh slices, according to variety, batch and ripening temperature. As for lightness, the regression lines were very close to the first bisector, indicating that drying has only caused very slight hue variations, with slopes very close to 1. The results of the mixed model show that ripening temperature alone had a significant impact $P = 3 \times 10^{-3}$; (Table 3) on hue changes during drying.

For Batches 1 (Cogshall), 3 and 4 (Kent), harvested at the green mature stage, mangoes ripened at 35 °C had higher slopes and lower intercepts than those at 20 °C. A higher slope and lower intercept indicate that the decrease in H^* during drying was greater for ripe mangoes (low H^*) than for immature mangoes (high H^*). Hence, ripe fruits ripened at 35 °C had a greater tendency for a reduction in hue than ripe fruits ripened at 20 °C during drying. Conversely, the regression line from Batch 2 ripened at 35 °C had a lower slope and a higher intercept than those at 20 °C. At the yellow-point stage, the higher the ripening temperature, the more the color of the mango slices was retained during drying. This specificity should be derived from the yellow-point harvest stage (cv. Cogshall); the fruits have accumulated more metabolites than those harvested earlier, but have also already begun their climacteric crisis favoring all the biochemical mango ripening processes. Joas et al. [56] showed that fruits harvested at the yellow point stage (127–130 days after full bloom) and then ripened at 20 °C had a higher carotenoids content than those harvested at the green stages (106 and 120 days after full bloom) and ripened at 20 °C.

At a given ripening temperature, a later harvest for Cogshall (Batch 2) or for Kent (Batch 4) also resulted in higher slopes and lower intercepts than for mangoes harvested earlier (Batches 1 and 4). These results are directly linked with Figure 1, which also show that the dried slices from mangoes ripened at 35 °C or harvested later (Batches 2 and 4) have weaker hues than those ripened at 20 °C or harvested earlier (Batches 1 and 3). The carotenoids content, which is negatively correlated with the flesh hue [57], increases significantly with harvest stage and ripening temperature [4,23]. The higher carotenoid contents on ripe mangoes should lead to more oxidative reactions and breakdown reactions reducing the hue after drying. For Mahayothee et al. [4], oxidation during convective drying caused significantly greater browning of very ripe mangoes, characterized by a reduction in the H^* dried/ H^* fresh ratio as the mango degree of maturity increased. Our data are consistent with this result, since the H^* dried/ H^* fresh ratio fell with maturity.

III.3.3 Chroma (C^*)

The mixed model shows that all the pre- and postharvest factors had a highly significant effect on the slope of the relationship between C^* fresh and C^* dried (Table 3; Figure 4). The changes to C^* during ripening and drying differ according to the variety (Figures 1 and 4). For cv. Cogshall, the mangoes started at an already high C^* saturation (dark yellow), which remained practically constant for most categories (see Section 3.2). The low C^* variations degraded the prediction quality for cv. Cogshall. Therefore, for this experiment, C^* is not a good color tracking indicator during drying for cv. Cogshall, since the prediction models are not robust ($R^2 < 0.3$ for 20 °C). Rosalie et al. [57] found that for Cogshall, Chroma C^* had a weak correlation with carotenoids content, which was more correlated with H^* . For this variety, a Floridian type, which is rather orange-colored when ripe, several authors have used hue as the color tracking indicator [42,50,58]. However, for polyembryonic South-East Asian varieties, such as cv. Namdokmai Sithong, the pulp has a pale yellow color on harvesting, which intensifies during ripening with an increase in C^* to dark yellow at the end of ripening [59], and it has been reported that C^* is well correlated with beta-carotenes content.

For Kent, the extended variation range of C^* provided a better prediction quality. Analysis of the mixed model applied to cv. Kent shows that the ripening temperature ($p = 2 \times 10^{-5}$; $p = 0.003$, respectively, the slope and intercept) and the Batch factor ($p = 0.009$) had a significant effect on the relationship between C^* before drying and C^* after drying. In fact, the prediction models show that ripening at 35 °C reduced the slope values and increased the intercept values of the regression lines in relation to those at 20 °C (Figure 4). The fall in the slope value indicates that drying caused a greater reduction in the C^* of ripe mangoes ripened at 20 °C. At 35 °C, the mangoes had more advanced maturity, with C^* values not only higher but also better conserved during drying than at 20 °C (see Section 3.2). Corzo and Álvarez [55] also showed that the change in C^* during drying in hot air was less for ripe mangoes than for green or half-ripe mangoes. Mangoes ripened at 35 °C attained maximum C^* saturation before drying, with a higher hue (maximum carotenoids content at the ready-to-eat stage), while drying led to a slight increase in saturation for mangoes ripened at 20 °C, which had a lower hue and saturation.

IV. Conclusions

Drying slices of 4 mm thick at 60 °C, 30% RH, 1 m/s for 5 h proved very good at conserving the color of fresh mango slices. The statistical analyses revealed numerous significant effects between the pre- and postharvest factors and the color alterations occurring during drying, even if their impact was low.

Fruits with advanced maturity, and ripened at 35 °C, were more likely to have a fall in hue H^* , but were better at conserving purity of color C^* during drying. The fall in luminance L^* during drying, indicating browning/darkening, and potentially leading to consumer rejection of the mango slices, proved to be small under our drying conditions,

and very little affected by preharvest and postharvest factors. The Kent variety dried slices appeared to have a more attractive color, with a more orange hue.

Supplementary Materials: The following are available online at <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/3/490/s1>, Figure S1. Relationships between C* and L* from color measurements on dried mangoes according to varieties, harvest stages, ripening temperatures, and maturity.

Author Contributions: Conceptualization, A.D., J.-M.M. and M.L.; methodology, software, validation, formal analysis, A.D., F.C., J.-M.M., and M.L.; investigation, A.D.; resources, J.-M.M., M.C. (Marc Chillet), N.D.N., C.M.; data curation, A.D.; writing—original draft preparation, A.D.; writing—review and editing, A.D., J.-M.M., M.L., F.C., N.D.N., C.M., M.C. (Marc Chillet) and M.C. (Mady Cissé); supervision, J.-M.M., M.L., N.D.N., C.M., and M.C. (Marc Chillet); project administration, A.D., J.-M.M., M.L., M.C. (Marc Chillet) and M.C. (Mady Cissé); funding acquisition, J.-M.M. and M.C. (Marc Chillet). All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was carried out as part of “Interfaces” flagship project, publicly funded through ANR (the French National Research Agency) under the “Investissements d’avenir” program, with the reference ANR-10-LABX-001-01 Labex Agro and coordinated by “Agropolis Fondation” under the reference ID 1603-001.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: We would like to thank Ahmed Taïbi, Jerome Minier, Mathilde Hoareau and Charlotte Delpéch from Cirad-UMR-Qualisud for their contribution to this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

References

1. Russo, P.; Adiletta, G.; Di Matteo, M. The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant. *Food Bioprod. Process.* **2013**, *91*, 249–256. [\[CrossRef\]](#)
2. Bonneau, A.; Boulanger, R.; Lebrun, M.; Maraval, I.; Gunata, Z. Aroma compounds in fresh and dried mango fruit (*Mangifera indica* L. cv. Kent): Impact of drying on volatile composition. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2016**, *51*, 789–800. [\[CrossRef\]](#)
3. Kwaśnica, A.; Pachura, N.; Masztalerz, K.; Figiel, A.; Zimmer, A.; Kupczyński, R.; Wujcikowska, K.; Carbonell-Barrachina, A.A.; Szumny, A.; Rózański, H. Volatile Composition and Sensory Properties as Quality Attributes of Fresh and Dried Hemp Flowers (*Cannabis sativa* L.). *Foods* **2020**, *9*, 1118. [\[CrossRef\]](#)
4. Mahayothee, B.; Neidhart, S.; Carle, R.; Mühlbauer, W. Effects of variety, ripening condition and ripening stage on the quality of sulphite-free dried mango slices. *Eur. Food Res. Technol.* **2006**, *225*, 723–732. [\[CrossRef\]](#)
5. Stamenković, Z.; Pavkov, I.; Radojčin, M.; Horecki, A.T.; Kešelj, K.; Kovačević, D.B.; Putnik, P. Convective Drying of Fresh and Frozen Raspberries and Change of Their Physical and Nutritive Properties. *Foods* **2019**, *8*, 251. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
6. Çelen, S. Effect of Microwave Drying on the Drying Characteristics, Color, Microstructure, and Thermal Properties of Trabzon Persimmon. *Foods* **2019**, *8*, 84. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
7. Izli, N.; Izli, G.; Taskin, O. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Sci. Technol.* **2017**, *37*, 604–612. [\[CrossRef\]](#)
8. Link, J.V.; Tribuzi, G.; Laurindo, J.B. Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. *LWT* **2017**, *84*, 717–725. [\[CrossRef\]](#)
9. Weil, M.; Sing, A.S.C.; Méot, J.-M.; Boulanger, R.; Bohuon, P. Impact of blanching, sweating and drying operations on pungency, aroma and color of Piper borbonense. *Food Chem.* **2017**, *219*, 274–281. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
10. Barrett, D.M.; Beaulieu, J.C.; Shewfelt, R. Color, Flavor, Texture, and Nutritional Quality of Fresh-Cut Fruits and Vegetables: Desirable Levels, Instrumental and Sensory Measurement, and the Effects of Processing. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2010**, *50*, 369–389. [\[CrossRef\]](#)
11. Arnoldus, M.; Van der Pol, F.; Kima, B.; Nana, V.; Soufountera, M. *Amélioration des Performances de la Filière des Produits Transformés de la Mangue au Burkina Faso et au Mali*; Une étude pour la Banque Mondiale, le PCDA et le PAFASP, financée par l’Union Européenne; World Bank: Washington, DC, USA, 2009.
12. Ndiaye, C.; Xu, S.-Y.; Wang, Z. Steam blanching effect on polyphenoloxidase, peroxidase and colour of mango (*Mangifera indica* L.) slices. *Food Chem.* **2009**, *113*, 92–95. [\[CrossRef\]](#)

13. Korbel, E.; Attal, E.-H.; Grabulos, J.; Lluberas, E.; Durand, N.; Morel, G.; Goli, T.; Brat, P. Impact of temperature and water activity on enzymatic and non-enzymatic reactions in reconstituted dried mango model system. *Eur. Food Res. Technol.* **2013**, *237*, 39–46. [\[CrossRef\]](#)
14. Tamanna, N.; Mahmood, N. Food Processing and Maillard Reaction Products: Effect on Human Health and Nutrition. *Int. J. Food Sci.* **2015**, *2015*, 1–6. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Chen, J.; Tai, C.; Chen, B. Effects of different drying treatments on the stability of carotenoids in Taiwanese mango (*Mangifera indica* L.). *Food Chem.* **2007**, *100*, 1005–1010. [\[CrossRef\]](#)
16. Sogi, D.S.; Siddiq, M.; Dolan, K.D. Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. *LWT* **2015**, *62*, 564–568. [\[CrossRef\]](#)
17. Sehrawat, R.; Nema, P.K.; Kaur, B.P. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods. *LWT* **2018**, *92*, 548–555. [\[CrossRef\]](#)
18. Sulaiman, S.F.; Ooi, K.L. Polyphenolic and Vitamin C Contents and Antioxidant Activities of Aqueous Extracts from Mature-Green and Ripe Fruit Fleshes of *Mangifera* sp. *J. Agric. Food Chem.* **2012**, *60*, 11832–11838. [\[CrossRef\]](#)
19. Hossain, A.; Rana, M.; Kimura, Y.; Roslan, H.A. Changes in Biochemical Characteristics and Activities of Ripening Associated Enzymes in Mango Fruit during the Storage at Different Temperatures. *BioMed Res. Int.* **2014**, *2014*, 1–11. [\[CrossRef\]](#)
20. Hu, K.; Dars, A.G.; Liu, Q.; Xie, B.; Sun, Z. Phytochemical profiling of the ripening of Chinese mango (*Mangifera indica* L.) cultivars by real-time monitoring using UPLC-ESI-QTOF-MS and its potential benefits as prebiotic ingredients. *Food Chem.* **2018**, *256*, 171–180. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
21. Palafox-Carlos, H.; Yahia, E.; Islas-Osuna, M.; Gutierrez-Martinez, P.; Robles-Sánchez, M.; González-Aguilar, G. Effect of ripeness stage of mango fruit (*Mangifera indica* L., cv. Ataulfo) on physiological parameters and antioxidant activity. *Sci. Hortic.* **2012**, *135*, 7–13. [\[CrossRef\]](#)
22. Liu, F.-X.; Fu, S.-F.; Bi, X.-F.; Chen, F.; Liao, X.-J.; Hu, X.-S.; Wu, J.-H. Physico-chemical and antioxidant properties of four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars in China. *Food Chem.* **2013**, *138*, 396–405. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
23. Baloch, M.K.; Bibi, F. Effect of harvesting and storage conditions on the post harvest quality and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *S. Afr. J. Bot.* **2012**, *83*, 109–116. [\[CrossRef\]](#)
24. Rosalie, R.; Léchaudel, M.; Dhuique-Mayer, C.; Dufossé, L.; Joas, J. Antioxidant and enzymatic responses to oxidative stress induced by cold temperature storage and ripening in mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Cogshall') in relation to carotenoid content. *J. Plant Physiol.* **2018**, 75–85. [\[CrossRef\]](#)
25. Yashoda, H.M.; Prabha, T.N.; Tharanathan, R.N. Mango ripening: Changes in cell wall constituents in relation to textural softening. *J. Sci. Food Agric.* **2006**, *86*, 713–721. [\[CrossRef\]](#)
26. Germain, K.; Benoit, B.K.; Israël, M.L.; Kansci, G.; Koubala, B.B.; Lape, I.M. Effect of ripening on the composition and the suitability for jam processing of different varieties of mango (*Mangifera indica*). *Afr. J. Biotechnol.* **2003**, *2*, 301–306. [\[CrossRef\]](#)
27. Ibrahim, B.; Mouhamadou, F.; Moussoukhoye, D. Study of the Variation in Total and Reducing Sugars Contents According to the Variety and According to the Position Where the Fruit (Mango) Was Harvested from Five Mango Varieties Exploited in Senegal. *J. Biosci. Med.* **2020**, *8*, 28–36. [\[CrossRef\]](#)
28. Razzaq, K.; Khan, A.S.; Malik, A.U.; Shahid, M. Ripening period influences fruit softening and antioxidative system of 'Samar Bahisht Chaunsa' mango. *Sci. Hortic.* **2013**, *160*, 108–114. [\[CrossRef\]](#)
29. De Medeiros, R.A.B.; Barros, Z.M.P.; De Carvalho, C.B.O.; Neta, E.G.F.; Maciel, M.I.S.; Azoubel, P.M. Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. *LWT* **2016**, *67*, 167–173. [\[CrossRef\]](#)
30. Pu, Y.-Y.; Sun, D.-W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. *Biosyst. Eng.* **2017**, *156*, 108–119. [\[CrossRef\]](#)
31. Méndez-Calderón, E.K.; Ocampo-Castaño, J.C.; Orrego, C.E. Optimization of convective drying assisted by ultrasound for Mango Tommy (*Mangifera indica* L.). *J. Food Process. Eng.* **2017**, *41*, e12634. [\[CrossRef\]](#)
32. Gill, P.P.S.; Jawandha, S.K.; Kaur, N. Transitions in mesocarp colour of mango fruits kept under variable temperatures. *J. Food Sci. Technol.* **2017**, *54*, 4251–4256. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
33. Nambi, V.; Thangavel, K.; Jesudas, D. Scientific classification of ripening period and development of colour grade chart for Indian mangoes (*Mangifera indica* L.) using multivariate cluster analysis. *Sci. Hortic.* **2015**, *193*, 90–98. [\[CrossRef\]](#)
34. Penchaiya, P.; Tijskens, L.M.; Uthairatanakij, A.; Srilaong, V.; Tansakul, A.; Kanlayanarat, S. Modelling quality and maturity of 'Namdokmai Sithong' mango and their variation during storage. *Postharvest Biol. Technol.* **2020**, *159*, 111000. [\[CrossRef\]](#)
35. Zhen, O.P.; Hashim, N.; Maringgal, B. Quality evaluation of mango using non-destructive approaches: A review. *J. Agric. Food Eng.* **2020**, *1*, 1–8. [\[CrossRef\]](#)
36. Ihns, R.; Savage, G.P.; Diamante, L.M.; Vanhanen, L. Effect of temperature on the drying characteristics, colour, antioxidant and beta-carotene contents of two apricot varieties. *Int. J. Food Sci. Technol.* **2011**, *46*, 275–283. [\[CrossRef\]](#)
37. Tkacz, K.; Wojdyło, A.; Michalska-Ciechanowska, A.; Turkiewicz, I.P.; Lech, K.; Nowicka, P. Influence Carrier Agents, Drying Methods, Storage Time on Physico-Chemical Properties and Bioactive Potential of Encapsulated Sea Buckthorn Juice Powders. *Molecules* **2020**, *25*, 3801. [\[CrossRef\]](#)
38. Pu, Y.-Y.; Zhao, M.; O'Donnell, C.; Sun, D.-W. Nondestructive quality evaluation of banana slices during microwave vacuum drying using spectral and imaging techniques. *Dry. Technol.* **2018**, *36*, 1542–1553. [\[CrossRef\]](#)

39. Zheng, H. A Least-Squares Support Vector Machine (LS-SVM) Based on Fractal Analysis and CIELab Parameters for the Detection of Browning Degree on Mango (*Mangifera Indica* L.). *Comput. Electron. Agric.* **2012**, *83*, 47–51. [CrossRef]
40. Sturm, B.; Hofacker, W.C.; Hensel, O. Optimizing the Drying Parameters for Hot-Air-Dried Apples. *Dry. Technol.* **2012**, *30*, 1570–1582. [CrossRef]
41. Romainum, I.M.; Worarad, K.; Srilaong, V.; Yamane, K. Fruit quality and antioxidant capacity of six Thai mango cultivars. *Agric. Nat. Resour.* **2018**, *52*, 208–214. [CrossRef]
42. Léchaudel, M.; Urban, L.; Joas, J. Chlorophyll Fluorescence, a Nondestructive Method To Assess Maturity of Mango Fruits (Cv. 'Cogshall') without Growth Conditions Bias. *J. Agric. Food Chem.* **2010**, *58*, 7532–7538. [CrossRef]
43. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2019; Available online: <http://www.R-project.org/> (accessed on 25 February 2021).
44. Bates, D.; Mächler, M.; Bolker, B.; Walker, S. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *J. Stat. Softw.* **2015**, *67*, 1–48. [CrossRef]
45. Venables, W.N.; Ripley, B.D. *Modern Applied Statistics with S*, 4th ed.; Statistics and Computing; Springer: New York, NY, USA, 2002; ISBN 978-0-387-95457-8.
46. Lebrun, M.; Plotto, A.; Goodner, K.; Ducamp, M.-N.; Baldwin, E. Discrimination of mango fruit maturity by volatiles using the electronic nose and gas chromatography. *Postharvest Biol. Technol.* **2008**, *48*, 122–131. [CrossRef]
47. Léchaudel, M.; Joas, J. Quality and maturation of mango fruits of cv. Cogshall in relation to harvest date and carbon supply. *Aust. J. Agric. Res.* **2006**, *57*, 419–426. [CrossRef]
48. Lalel, H.J.D.; Singh, Z.; Tan, S.C.; Agustí, M. Maturity stage at harvest affects fruit ripening, quality and biosynthesis of aroma volatile compounds in 'Kensington Pride' mango. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2003**, *78*, 225–233. [CrossRef]
49. Bally, I.S.E.; Lu, P.; Johnson, P.R. Mango Breeding. In *Breeding Plantation Tree Crops: Tropical Species*; Jain, S.M., Priyadarshan, P.M., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2009; pp. 51–82. ISBN 978-0-387-71201-7.
50. Joas, J.; Caro, Y.; Léchaudel, M. Comparison of postharvest changes in mango (cv Cogshall) using a Ripening class index (Rci) for different carbon supplies and harvest dates. *Postharvest Biol. Technol.* **2009**, *54*, 25–31. [CrossRef]
51. Nordey, T.; Léchaudel, M.; Génard, M.; Joas, J. Spatial and temporal variations in mango colour, acidity, and sweetness in relation to temperature and ethylene gradients within the fruit. *J. Plant Physiol.* **2014**, *171*, 1555–1563. [CrossRef] [PubMed]
52. Ornelas-Paz, J.D.J.; Yahia, E.M.; Gardea, A.A. Changes in external and internal color during postharvest ripening of 'Manila' and 'Ataulfo' mango fruit and relationship with carotenoid content determined by liquid chromatography–APCI+–time-of-flight mass spectrometry. *Postharvest Biol. Technol.* **2008**, *50*, 145–152. [CrossRef]
53. Maskan, M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* **2001**, *48*, 169–175. [CrossRef]
54. Vilhena, N.Q.; Gil, R.; Llorca, E.; Moraga, G.; Salvador, A. Physico-Chemical and Microstructural Changes during the Drying of Persimmon Fruit cv. Rojo Brillante Harvested in Two Maturity Stages. *Foods* **2020**, *9*, 870. [CrossRef]
55. Corzo, O.; Alvarez, C. Color Change Kinetics of Mango at Different Maturity Stages during Air Drying. *J. Food Process. Preserv.* **2012**, *38*, 508–517. [CrossRef]
56. Joas, J.; Vulcain, E.; Léchaudel, M. Effect of fruit position in the canopy on physiological age and physicochemical composition of mango 'cogshall'. *Acta Hortic.* **2013**, 123–128. [CrossRef]
57. Rosalie, R.; Léchaudel, M.; Chillet, M.; Dufossé, L.; Joas, J. Could the reliability of classical descriptors of fruit quality be influenced by irrigation and cold storage? The case of mango, a climacteric fruit. *J. Sci. Food Agric.* **2019**, *99*, 3792–3802. [CrossRef]
58. Nordey, T.; Davrieux, F.; Léchaudel, M. Predictions of fruit shelf life and quality after ripening: Are quality traits measured at harvest reliable indicators? *Postharvest Biol. Technol.* **2019**, *153*, 52–60. [CrossRef]
59. Rungpichayapichet, P.; Mahayothee, B.; Khuwijtjaru, P.; Nagle, M.; Müller, J. Non-destructive determination of β -carotene content in mango by near-infrared spectroscopy compared with colorimetric measurements. *J. Food Compos. Anal.* **2015**, *38*, 32–41. [CrossRef]

Supplementary Material

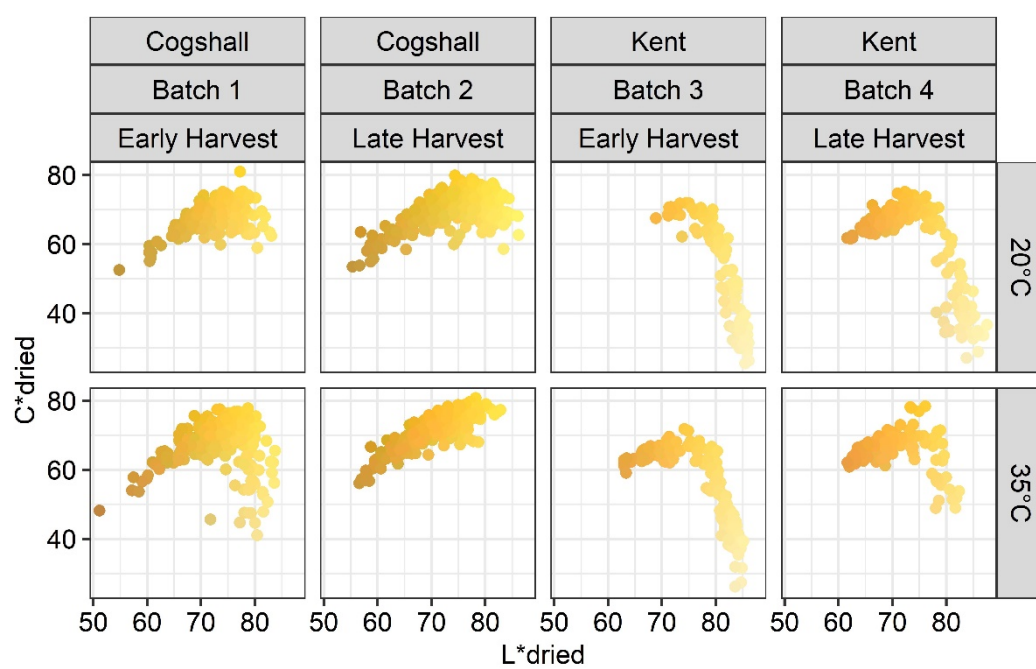


Figure S1. Relationships between C^* and L^* from color measurements on dried mangoes according to varieties, harvest stages, ripening temperatures, and maturity. The color of the points was obtained by converting L^*+10 , H^* and C^* coordinates into RGB.

Chapitre II. Impact de diagramme de séchage spéciaux sur la stabilité de la couleur des mangues de maturités différentes

Objectifs

Selon Diop et al. (2021), lorsqu'on dispose d'un séchage bien adapté aux produits de mangue, les fluctuations de qualité des mangues sèches naturelles proviennent des variations de la qualité des matières premières liées. L'hétérogénéité des mangues sur arbre ne peut qu'être légèrement réduite par de bonnes conduites de récolte et de maturation. En plus de cette hétérogénéité, les opérateurs de séchage de mangues sèches naturelles ainsi que les distributeurs rapportent aussi les défauts de séchage dus à l'impossibilité de fixer des diagrammes de séchage constants et efficaces. Cette partie présente ainsi l'étude de l'impact de différents diagrammes de séchage sur les modifications de couleur et leur capacité à corriger des défauts de couleur constatés sur la pulpe des mangues fraîches. Les diagrammes ont été choisis de sorte à reproduire des conditions de température et d'humidité relative souvent rencontrées en unité de séchage en prenant en compte les étapes (début et fin) de séchage auxquelles ces conditions peuvent être relevées.

Résultats marquants

- Le séchage standard à 60 °C, 30 %HR et 1 m/s pendant 5h permet de conserver la couleur de tranches de mangues de 4 mm, quelle que soit la maturité des mangues.
- Une augmentation de l'humidité relative de 30% à 60% HR pendant la première heure de séchage provoque un brunissement de toutes pièces de fruits, sensiblement plus important de celles issues de fruits mûrs.
- Une augmentation de la température de 60 à 80 °C durant la dernière heure de séchage provoque un brunissement de toutes les pièces de fruits, légèrement plus important de celles issues de fruits immatures.
- Les hypothèses d'explications des phénomènes combinés (transferts, réactions) des résultats obtenus ne laissent pas espérer qu'il soit possible de corriger par le séchage des défauts de qualité de mangues fraîches.

Impact de diagrammes de séchage spéciaux sur la stabilité de la couleur des mangues de maturités différentes

I. Abstract

Dans une précédente étude a été démontré que la couleur de tranches de mangues de 4 mm n'est que très peu modifiée par un séchage de 5h à 60°C, 30%HR et 1 m/s. Les objectifs de cette étude complémentaire étaient de déterminer l'impact de conduites de séchage non-optimales mais correctes sur les modifications de couleur de tranches de mangues non-sulfitées et de savoir si une modulation des conditions de séchage choisies pourrait permettre de corriger des défauts de couleur constatés sur la pulpe de mangues fraîches. Des séchages avec différentes combinaisons température/humidité/durée ont été effectués pour analyser leur effet sur la couleur des mangues sèches naturelles de différentes maturités. Elles ont été séchées avec une vitesse d'air de 1.0 m/s pendant 5 h selon 3 diagrammes : un séchage standard (SS) à 60 °C et 30 % HR, un séchage humide (SH) 1h à 60 °C et 60 %HR suivie de 4h de SS et un enfin un séchage chaud (SC) 4 h de SS suivies de 1 h à 80 °C et 30 %HR. La couleur des tranches de mangues a été analysée avant et après séchage.

Le SS conserve très bien la couleur des mangues fraîches quelle que soit leur maturité. Un début de séchage relativement lent (SH) a un impact très négatif, d'autant plus important que la maturité est avancée. Le brunissement est déjà important pour des mangues dont la qualité est proche de l'optimum ($L^* = 75$; $H^\circ = 92$). L'application de haute température en fin de séchage (SC) pendant 20% du temps a un impact négatif plus limité, les mangues peu mûres étant les plus sensibles.

Aucune des conditions testées ne laisse entrevoir une éventualité de moduler la conduite du séchage afin de corriger un défaut qu'auraient les mangues fraîches. Le meilleur des diagrammes ne permet que de conserver la qualité initiale, mais il ne l'améliore pour aucune des mangues.

II. Introduction

La couleur des mangues sèches naturelles, sans sulfite, évolue lors de leur stockage jusqu'à les rendre peu appétentes et non-commercialisables (Arnoldus et al., 2009). Désormais, elles sont maintenues en température dirigée par de nombreux opérateurs et il est conseillé aux consommateurs de les conserver au réfrigérateur. Comme pour la patate douce orange (Bechoff et al., 2009), la couleur constatée est le résultat de l'accumulation de réactions qui se développent lors de la maturation du végétal, du parage – découpe et mise en claies, du séchage puis de la conservation. Diop et al. (2021) ont montré qu'un « bon séchage » ne modifie que très peu la couleur de la pulpe de mangue fraîche quelle que soit cette couleur et son origine. Les opérateurs d'unités de production soulignent souvent que ce n'est pas le cas en conditions réelles, et que notamment, des produits trop sombres sont présents.

Les deux explications généralement admises (Korbel, 2014b) sont les suivantes :

- Une puissance de chauffage et une ventilation limitées qui conduisent à une phase 1 de séchage trop longue et conséquemment, un développement des réactions de brunissement enzymatiques à la surface des morceaux de mangues (Pott et al., 2005);
- Une température de fin de séchage élevée, que ce soit par méconnaissance ou par besoin d'accélérer la diffusion de l'eau, qui induit le développement de réactions de Maillard.

Ces explications sont issues de la combinaison des connaissances en transferts et en réactions. En reprenant la schématisation en trois phases du comportement au séchage d'un produit biologique (Bonazzi and Bimbenet, 2003), les conditions intensives dans le produit et à sa surface peuvent être décrites comme suit. Les pièces de mangues se réchauffent pendant (« phase 0 » aussi nommée « période de mise en température ». La température de surface des produits est faible et atteint progressivement la température humide qui dépend de la température et de l'humidité relative de l'air asséchant (Bonazzi and Bimbenet, 2003). Ensuite, les transferts externes sont limitants (« phase 1 » aussi nommée « période à vitesse de séchage constante »). L' a_w de surface est proche de 1 et la température est égale la température humide. Les transferts internes sont limitants lorsque l' a_w de surface passe en dessous de 1. C'est la « phase 2 » aussi nommée « période à vitesse décroissante ». A cette phase, la température de surface augmente et la teneur en eau diminue jusqu'à atteindre des valeurs qui dépendent des caractéristiques de l'air et de la composition du produit (Bonazzi and Bimbenet, 2003).

Pendant la phase 1 du séchage, la forte teneur en eau est favorable aux réactions de brunissement enzymatiques (Rosatella et al., 2011) alors qu'elle est excessive pour les réactions de Maillard (Vaikousi et al., 2008). La température modifie peu la vitesse de réaction spécifique de l'enzyme et à partir de 50 °C, elle inactive progressivement les enzymes (Wang et al., 2007). En séchage, un brunissement est souvent constaté mais dans des conditions extrêmes bien choisies, l'effet principal peut être l'inactivation enzymatique (Derardja et al., 2019). Au cours de la phase 2, l'activité en eau de la matière devient rapidement inférieure à 1, notamment au niveau de la surface. Cette zone est particulièrement sensible car (i) c'est sa couleur qui est perçue, (ii) elle porte des cellules atteintes dans leur intégrité et (iii) elle est au contact de l'oxygène de l'air. Les vitesses de brunissement enzymatique baissent rapidement, alors que les conditions deviennent favorables pour les réactions de Maillard et d'oxydation des caroténoïdes. Les très nombreuses publications portant sur les activités enzymatiques et les réactions de Maillard font penser que des approches par modélisation seraient aisées, d'autant plus que les transferts d'eau et de chaleur ont été modélisés (Dissa et al., 2008; Janjai et al., 2008). Il n'en est rien. Pour les réactions enzymatiques de brunissement, c'est essentiellement les cinétiques de désactivation qui ont été étudiées et pour les réactions de Maillard, c'est essentiellement les cinétiques de changement de concentration de composés intermédiaires (Korbel et al., 2013b). Les renseignements apportés sont intéressants mais des éléments essentiels manquent pour simuler les modifications de la couleur.

Dans cette étude, différents diagrammes de séchage (temps / température / humidité relative de l'air) ont été appliqués à des tranches de mangues de différentes maturités. Des analyses de covariance ont été effectuées pour tester si les relations entre les indices de couleur mesurés sur les tranches sèches et ceux mesurés sur les mêmes tranches avant séchage étaient influencés par le type de séchage. Les résultats montrent que la stabilité de la couleur des mangues pendant le séchage dépend en même temps du type de séchage et de la maturité des fruits.

III. Matériels et méthodes

III.1 *Matériel Végétal*

60 mangues de la variété cv. Cogshall ont été récoltées au stade point-jaune. Ce stade spécifique de la variété cv. Cogshall correspond au début de la crise climactérique, se reconnaissant avec le jaunissement du bout de l'apex de la mangue (Léchaudel et al., 2010). Pour cette expérience, le but de la mise en maturation était de créer de la variabilité de maturité en faisant des sorties successives espacées de 2 jours. Ensuite, prélever des mangues de chaque sortie pour constituer

3 lots avec le même nombre de mangues issues de chaque sortie, destinés à 3 types de séchage différents. A la récolte, chaque mangue a été repérée individuellement. Elles ont été mises en bain d'eau chlorée (Hypochlorite de sodium 0,6%) pendant 5 minutes, rincées 3 fois à l'eau claire puis mises en maturation à 20 °C. 20 mangues ont été prélevées respectivement à 2 jours et 4 jours. Dès prélèvement, elles ont été mises en conservation à 12 °C. Les 20 mangues restées 6 jours à 20 °C ont atteint la maturité telle que souhaitée pour la transformation en mangues sèches naturelles. Elles ont aussi été mises en conservation à 12 °C.

Au 7^{ième} jour, un lot de 20 mangues a été constitué à partir de 6 mangues mûres 2 jours, 6 mangues mûres 4 jours et 6 mangues mûres 6 jours. Chacune des 20 mangues a alors été épluchée puis découpée à l'aide d'une mandoline pour prélever 4 tranches d'épaisseur homogène de 4 mm, destinées au séchage. Le restant de chaque mangue a été broyé pour effectuer les analyses physico-chimiques. Chaque tranche a été identifiée de manière à connaître sa mangue d'origine avec son itinéraire de maturation – conservation. Les tranches ont été séchées dans des conditions de « Séchage Standard » telles que définies au paragraphe suivant. Au 8^{ième} jour, un lot de tranches de mangue a été constitué de manière similaire puis soumis au « Séchage Humide ». Au 9^{ième} jour matin, le troisième lot de tranches de mangue a été séché dans les conditions du « Séchage Chaud ».

III.2 *Séchage des mangues*

Chaque lot de fruits, comprenant des mangues de différentes maturités, a été séché selon un diagramme spécifique, avec un séchoir électrique à convection forcée à régulation d'humidité relative par injection de vapeur et par extraction d'air. La vitesse d'air a été de 1 m.s⁻¹ pour tous les essais. Le lot 1 a subi un séchage standard (SS), le lot 2 un séchage humide (SH) et le lot 3 un séchage chaud (SC). Le séchage standard a été effectué à une température et une humidité relative constantes respectivement de 60 °C et 30%RH. Sa durée est de 5 h. Le SH et le SC sont similaires au SS avec des modifications respectivement en première et dernière heure. Pour le SH, la première heure à 60%RH au lieu de 30%RH (SS). Pour le SC, la dernière heure est à 80°C au lieu de 60°C (SS).

III.3 *Mesure de la qualité*

Une mesure de couleur (moyenne de 5 flashes) a été effectuée au centre de chaque tranche, à l'aide d'un (Minolta CR-410, Tokyo, Japan). Les mesures ont été faites avant et après séchage pour pouvoir quantifier les variations de couleur. Les données L^* , a^* et b^* ont été converties en

L^* , H° et C^* . Les modifications de couleur sur la base du C^* n'ont pas été présentées du fait que cet indice n'est pas un bon prédicteur de l'évolution des teneurs en caroténoïdes pour la variété Cogshall (Rosalie et al., 2019), du brunissement et des modifications de couleur lors du séchage (Diop et al., 2021)

Les analyses chimiques ont été effectuées sur la pulpe résiduelle de chaque mangue broyée séparément. La teneur en solides solubles ($^\circ\text{Brix}$) a été mesurée avec un réfractomètre portable (PAL- α , Atago, Tokyo, Japan). L'acidité titrable et le pH ont été mesurés avec un titrateur automatique (TitroLine, Schott Instruments, Mainz, Germany) avec 1 g de pulpe, 10 ml d'eau et titré avec une solution NaOH de 0,05 N.

III.4 *Analyses statistiques et modélisation*

Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R (R Core Team., 2019). Les moyennes des paramètres physico-chimiques par durée de maturation ont été comparées par un test de Tukey pour évaluer l'effet des sorties successives sur l'évolution des caractéristiques qualité des mangues. Ensuite, des régressions linéaires ont été effectuées entre les indices de couleur (L^* sec, $H^\circ\text{sec}$) des mangues sèches, et ceux mesurées sur les mêmes tranches fraîches (L^* frais, H° frais) en fonction du type de séchage. L'effet du type de séchage a été analysé par une analyse de covariance avec les indices L^* frais et H° frais comme variables indépendantes, L^* sec et H° sec comme variable dépendantes, les facteurs (SS, SC et SH) comme covariables. Pour chaque relation Indice*sec = f (Indice*frais ; Type de séchage), une comparaison des pentes a été effectuée pour évaluer les différences entre les droites de régression. Une comparaison des intercepts a été effectuée dans le cas où les pentes ne sont pas significativement différentes ($p < 0,05$). Des groupes homogènes ont été constitués en fonction de ces différences ($p < 0,05$).

6 modèles linéaires ont été obtenus, correspondant à 1 relation linéaire par Indice Colorimétrique CI^* (L^* et H°) et par type de séchage (SS, SH, SC) :

$$CI_{sec,SS,modèle}^* = A_{sec,SS} + B_{sec,SS} CI_{frais,SS,exp}^* \quad (Eq. 1)$$

$$CI_{sec,SH,modèle}^* = A_{sec,SH} + B_{sec,SH} CI_{frais,SH,exp}^* \quad (Eq. 2)$$

$$CI_{sec,SC,modèle}^* = A_{sec,SC} + B_{sec,SC} CI_{frais,SC,exp}^* \quad (Eq. 3)$$

CI^* étant le « color index » (L^* ou H°) des mangues séchées prédit par les modèles de régression linéaire, A_{CI^*} et B_{CI^*} respectivement les intercepts et pentes des modèles linéaires en

fonction du type de séchage, $CI_{frais, type\ de\ séchage, exp}^*$ la valeur expérimentale de l'indice L^* ou H° mesurée sur les tranches fraîches avant chaque type de séchage.

Les différences ΔCI_i^* (ΔL^* et ΔH°) entre la droite de régression du séchage standard et les droites de régression des séchages chaud et humide ont été calculées pour chaque indice selon les équations pour le séchage humide, et pour le séchage chaud. Ensuite, des régressions linéaires multiples de ΔCI_i^* en fonction des paramètres physico-chimiques PC_i ($PC_1 = \text{TSS}$, $PC_2 = \text{pH}$, $PC_3 = \text{TA}$, $PC_4 = \text{TSS/TA}$) ont été réalisées.

$$\Delta CI_{i\ SS-SC}^* = (A_{sec,SS} - A_{sec,SC}) + (B_{sec,SS} - B_{sec,SC}) CI_{frais,SC,exp}^* \quad (Eq. 4)$$

$$\Delta CI_{i\ SS-SH}^* = (A_{sec,SS} - A_{sec,SH}) + (B_{sec,SS} - B_{sec,SH}) CI_{frais,SH,exp}^* \quad (Eq. 5)$$

L'interprétation des résultats des régressions multiples des ΔCI_i^* en fonction des PC_i a permis de relier les modifications de couleurs à la maturité des mangues.

IV. Résultats et discussion

IV.1 Effet de la maturation sur la qualité des mangues fraîches

La durée de maturation pour atteindre une bonne maturité pour le séchage a été de 6 jours à partir de la récolte. Cette durée courte est compréhensible car les mangues récoltées au stade point-jaune ont déjà débuté leur crise climactérique sur l'arbre. La phase pré-climactérique étant inexistante (Joas et al., 2009), l'évolution des caractéristiques physico-chimiques lors de la maturation est très rapide. La figure 7 montre l'évolution des paramètres physico-chimiques et colorimétriques lors de la maturation. Les sorties successives au jours 2, 4 et 6 ont permis d'obtenir des mangues de maturité croissante avec une augmentation significative ($p < 0,05$) du $^\circ\text{Brix}$ et du pH, et une baisse de l'acidité titrable. Selon (Yashoda et al., 2006), l'augmentation du $^\circ\text{Brix}$ est liée à la conversion de l'amidon en sucres simples. La figure 7A montre une stabilisation du $^\circ\text{Brix}$ à partir du 4^{ième} jour. En parallèle, la baisse des teneurs en acides citrique et malique entraîne la baisse de l'acidité titrable (Figure 7B) et l'augmentation du pH (Figure 7C) (Medlicott and Thompson, 1985). Au 6^{ième} jour, l'évolution de l'acidité titrable est presque terminée puisque la valeur atteinte est proche de 0. La couleur des mangues a aussi évolué lors de la maturation avec la baisse du L^* et du H) sans atteindre la stabilisation. Celle-ci n'aurait cependant pas tardé, les valeurs des indices de couleurs atteintes étant proches des optimums à 20 °C décrits par (Diop et al., 2021). Les évolutions des paramètres physico-chimiques et leur temporalité sont similaires à celles rapportées par Noiwan et al. (2017) sur la variété Nam Dok Mai. Au cours de leur expérience, le $^\circ\text{Brix}$ a atteint le maximum à 8 jours tandis que l'acidité,

la fermeté et la couleur ont continué d'évoluer jusqu'au 12^e jour. Ceci suggère des dynamiques différentes au cours de la maturation entre l'évolution des métabolites primaires (carbohydrates : amidon et sucres) et secondaires (caroténoïdes, arômes...). Pandit et al. (2010) avaient décrit que les expressions des gènes liés aux métabolismes primaires et secondaires n'étaient pas synchronisées. Les niveaux d'expression dépendraient du stade de croissance - maturation et de facteurs de stress biotiques (éthylène) et abiotiques (conditions de croissance). La création des différentes maturités a ainsi permis de constituer 3 lots similaires, chacun composé de fruits de trois maturités différentes : le lot 1 destiné au SS, le lot 2 au SH et le lot 3 au SC.

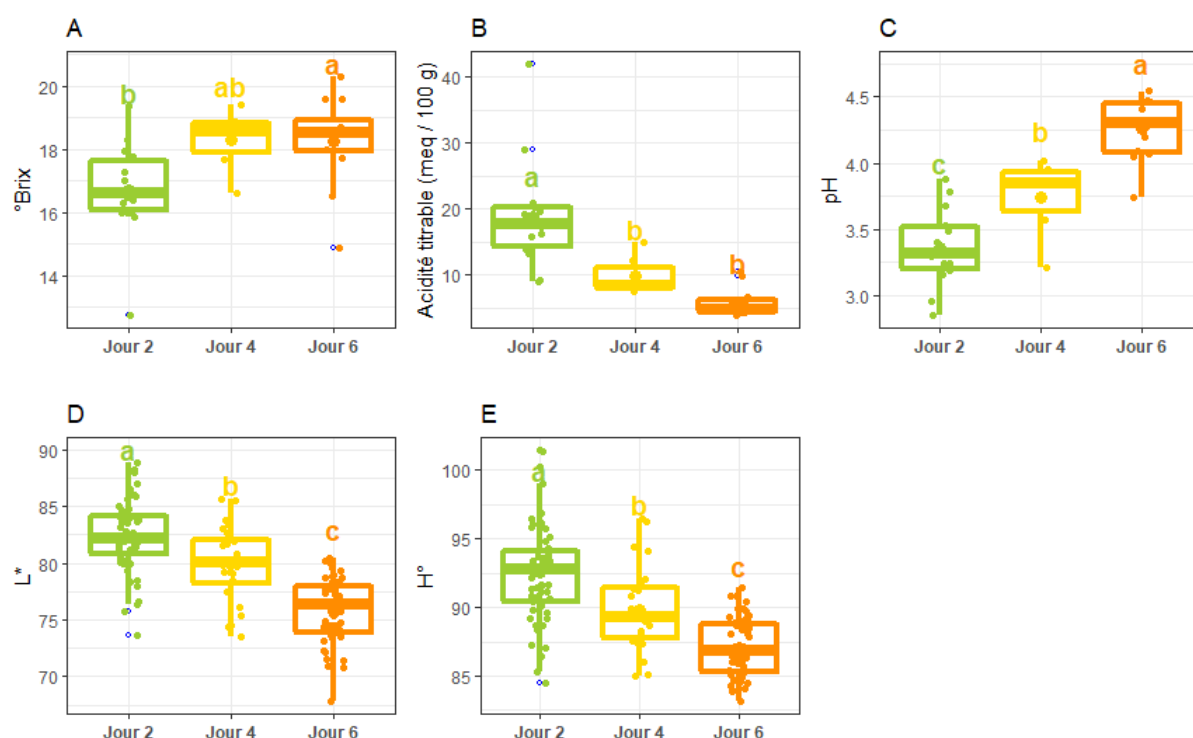


Figure 7 : Box-plots du °Brix, de l'acidité titrable, du pH, du L* et du H° en fonction de la durée de maturation à 20 °C. Les lettres représentent les groupes homogènes à $p < 5\%$.

IV.2 Effet du type de séchage et de la maturité sur les changements de couleur des mangues *sèches naturelles*

La figure 8 représente les régressions linéaires entre les indices de couleur L* et H° mesurés sur les tranches séchées selon les 3 conditions de séchage en fonction des mêmes indices mesurés sur les mêmes tranches fraîches. Le type de séchage a une influence sur les relations (Figures 8A et 8B). Les analyses de covariance et les comparaisons des pentes et/ou intercepts ont permis de préciser ces différences.

Le séchage standard ne modifie pas la luminance des mangues fraîches (Figure 2.A). La droite de régression est confondue avec la première bissectrice indiquant que la valeur de luminance après séchage est égale à celle de la mangue fraîche. Les résultats de Diop et al. (2021) ont été reproduits avec d'autres mangues : un séchage à 60 °C / 30 % HR / 1.0 m.s⁻¹ pendant 5 h n'entraîne que de très faibles modifications de la luminance des mangues fraîches. Les courbes enveloppe des intervalles de confiance à 95% des droites de régression des séchages chaud et humide sont totalement sous la première bissectrice, indiquant que la luminance après séchage est significativement plus faible que celle avant séchage. Des résultats similaires sont rapportés par Izli et al. (2017) et Zou et al. (2013).

La baisse de luminance provoquée par le séchage humide peut être attribuée essentiellement à du brunissement enzymatique (Pott et al., 2005). L'humidité relative plus élevée en début de séchage augmente la durée de phase 1 du séchage, caractérisée par un échange externe limitant. Durant cette phase, l'activité de l'eau de surface reste proche de 1 et la température du produit est proche de la température d'air humide. Cette dernière est de 39,7 °C pour un air à 60 °C et 30% HR et de 50,4 °C pour un air à 60 °C et 60% HR. Le maintien d'une a_w suffisante pour un bon développement des réactions de brunissement enzymatique et la faible réduction de la vitesse de réaction spécifique de l'enzyme (Wang et al., 2007) ressortent comme prépondérants à l'inactivation de l'enzyme à 50,4 °C.

La pente de la droite de régression linéaire $L_{\text{sec}} = f(L_{\text{frais}})$ du séchage humide est significativement différente ($p < 0,05$) de celles des séchages standard et chaud (Figure 2A). La pente supérieure à 1 et l'éloignement de la droite de régression à la première bissectrice aux basses luminances montrent la plus grande sensibilité des mangues les plus mûres (L^* faible) au brunissement enzymatique. La figure 9, montrant l'évolution du ΔL^* (L^* séchage standard – L^* séchage étudié) en fonction des indices de maturité confirme que l'augmentation de la maturité est associée à un brunissement plus important lors du séchage humide.

Les coefficients de corrélation des régressions du ΔL^* en fonction du pH et de l'acidité titrable (Tableau 3), deux indicateurs de maturité, sont supérieurs à 0,8 ($p < 10^{-15}$). Cette forte corrélation pourrait être due à l'augmentation de l'activité de la PPO avec l'augmentation du pH (Cheema and Sommerhalter, 2015) et par conséquent de la baisse de l'acidité. La sensibilité au brunissement des mangues les plus mûres peut aussi venir de leur richesse en polyphénols plus importante (Palafox-Carlos et al., 2012) et de la présence moindre de vitamine C (Robles-Sánchez et al., 2009) dont la concentration diminue au cours de la maturation (Hossain et al.,

2014). La moins grande corrélation avec le °Brix peut être attribuée au fait que ce paramètre a atteint son maximum rapidement durant la maturation et s'est stabilisé (Figure 7A). Inversement, la couleur et le pH ont continué d'évoluer de manière significative avec une plage de variation plus large (Figures 7C, 7D, 7E). Le même ordre de grandeur des variations du °Brix en fonction de la maturité et de la variabilité au sein d'un lot de séchage (Hor et al., 2020b) constitue une autre origine de la corrélation limitée entre ΔL^* et le °Brix.

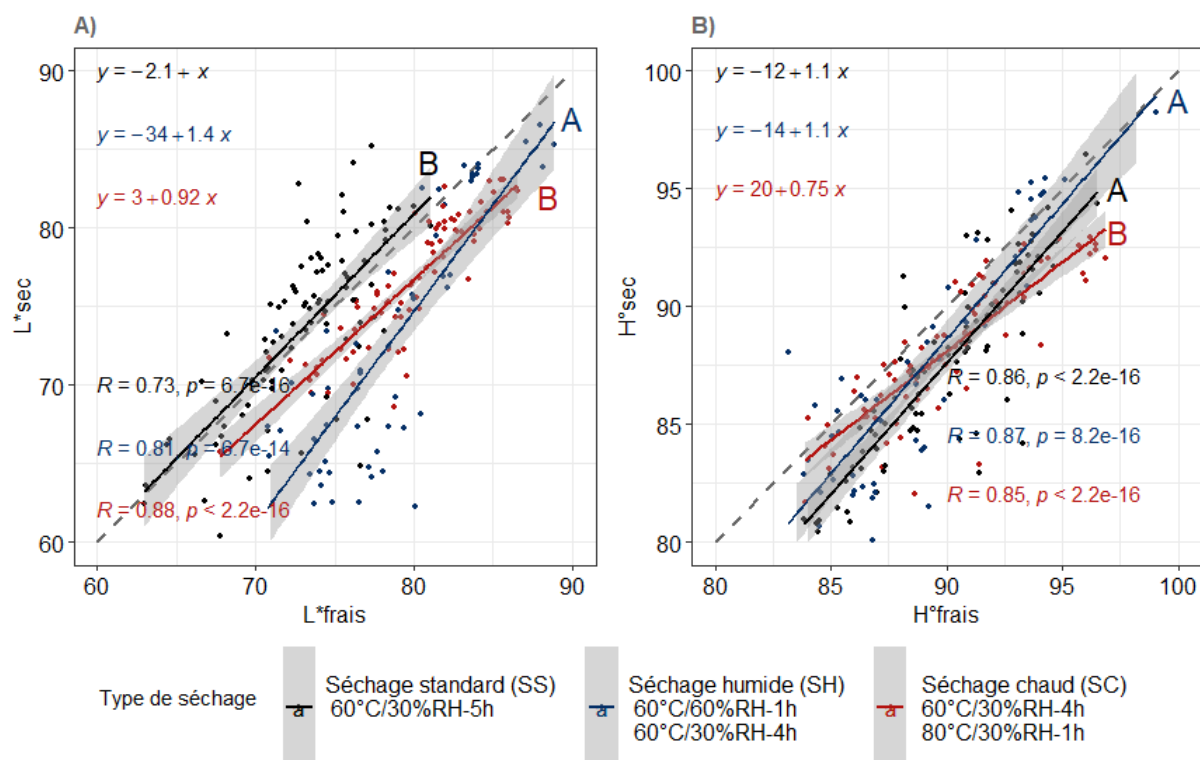


Figure 8: Régressions Indices Colorimétriques mesurés sur des tranches séchées en fonction des mêmes Indices Colorimétriques mesurés sur les mêmes tranches avant séchage. Ligne pointillée grise : première bissectrice ; autres lignes pleines avec enveloppes grises : droites de régression, et intervalles de confiance à 95%. Lettres : Groupes homogènes de droites à $p < 0.05$.

Le séchage chaud induit un abaissement de la luminance L^* sur l'ensemble du domaine étudié, de l'ordre de 3 unités (Figure 8A). Selon les analyses statistiques, la différence avec le séchage humide est significative ($p < 0,05$) (Figure 8A). Ne se différenciant du séchage standard que par une température plus élevée au cours de la dernière heure, le brunissement est attribuable aux réactions de Maillard (Michalska et al., 2016) avec un développement important aux a_w moyennes à faibles associé à des températures élevées. A la fin du séchage chaud, l'activité en eau est faible et la température élevée : conditions favorables à la réaction de Maillard. L'application d'une température de 80 °C sur une plus grande part du séchage ou l'utilisation

d'une température supérieure à 80 °C aurait provoqué un brunissement plus important (Maskan, 2001).

Il n'y a pas de différence significative au seuil de 95% entre les pentes des droites de régression (L^* sec en fonction de L^* frais) du séchage standard et du séchage chaud (Figure 8A). Contrairement aux résultats de (Corzo and Álvarez, 2014), il semble que les mangues les moins mûres sont les plus sensibles au brunissement (Figure 9) lors du séchage chaud. Cela est étonnant car les mangues les moins mûres, comparativement aux mangues mûres, (i) sont moins riches en sucres réducteurs et en protéines (Rosalie et al., 2018), (ii) leur pH plus bas est moins favorable aux réactions de Maillard (Pott et al., 2005), (iii) sont plus riches en vitamine C, (iv) ont des structures intracellulaires plus intègres. Cependant, l'atteinte d' a_w faibles, plus rapide pour les mangues contenant peu de sucres (Dissa et al., 2011) et la température élevée du séchage chaud pourrait être la cause de la réaction de Maillard légèrement plus intense pour ces mangues immatures.

Tableau 3: Coefficients de corrélation des régressions Δ Indice colorimétrique standard – séchage étudié=f(Chimie) pour les indices L^* et H° , selon les séchages humide et chaud.

Type de séchage	ΔL^*		ΔH°	
	Séchage humide (SH)	Séchage Chaud (SC)	Séchage humide (SH)	Séchage Chaud (SC)
°Brix	0.71	-0.63	0.66	-0.67
AT (meq/100 ml)	-0.83	0.66	0.9	0.71
pH	0.86	-0.71	-0.88	-0.77
TSS/TA	0.84	-0.64	-0.8	-0.67

R^2 en fonction du type de séchage et variable PCi. AT : Acidité titrable

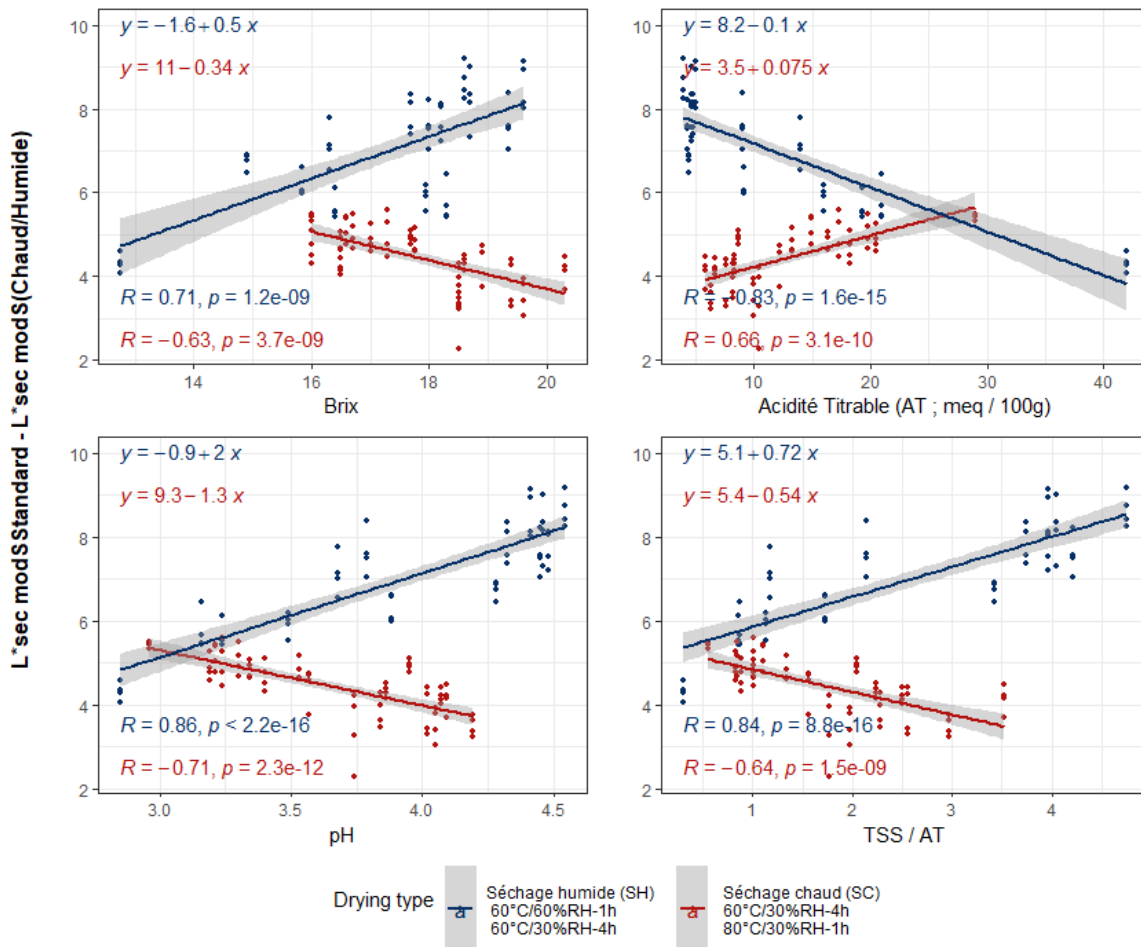


Figure 9 : Régressions ΔL^* en fonction des indices physico-chimiques selon les séchages humide et chaud.

Tous les types de séchage entraînent une modification de l'indice H° vers des teintes plus faibles comme le montre la position des points expérimentaux à la figure 8B. Cela est cohérent avec les observations de (Caparino et al., 2012; Nyangena et al., 2019) lors du séchage de mangues avec différentes techniques. Cette baisse serait due à une décoloration suite à la dégradation des caroténoïdes (Zou et al., 2013). Le séchage humide ne présente pas de différence significative avec le séchage standard, que ce soit au regard de sa courbe enveloppe à 95% ou de la comparaison des pentes et intercepts des droites de régression $H^{\circ}_{\text{sec}} = f(H^{\circ}_{\text{frais}})$ (Figure 8). Les modifications de H° induites par les séchages humide et standard ne dépendent que très légèrement de la maturité de mangues (Figure 10 ; Tableau 3). La figure 10 représentant le ΔH° ($H^{\circ}_{\text{séchage standard}} - H^{\circ}_{\text{séchage étudié}}$) en fonction des indices de maturité, montre une évolution du ΔH° quasiment constante pour le séchage humide. Le séchage chaud donne des résultats bien différents des deux autres séchages même si les moyennes des ΔH° sont proches : la modification de H° est fortement dépendante de la maturité (Figure 10 ; Tableau 3), elle est faible pour les mangues mûres et plus importante pour les mangues immatures. L'augmentation

de la teneur en caroténoïdes étant importante lors de la maturation, l'augmentation de la vitesse de réaction en fonction de la température (Ordóñez-Santos and Martínez-Girón, 2020) devrait être plus visible sur les mangues mûres donc riches en caroténoïdes que sur les mangues moins mûres.

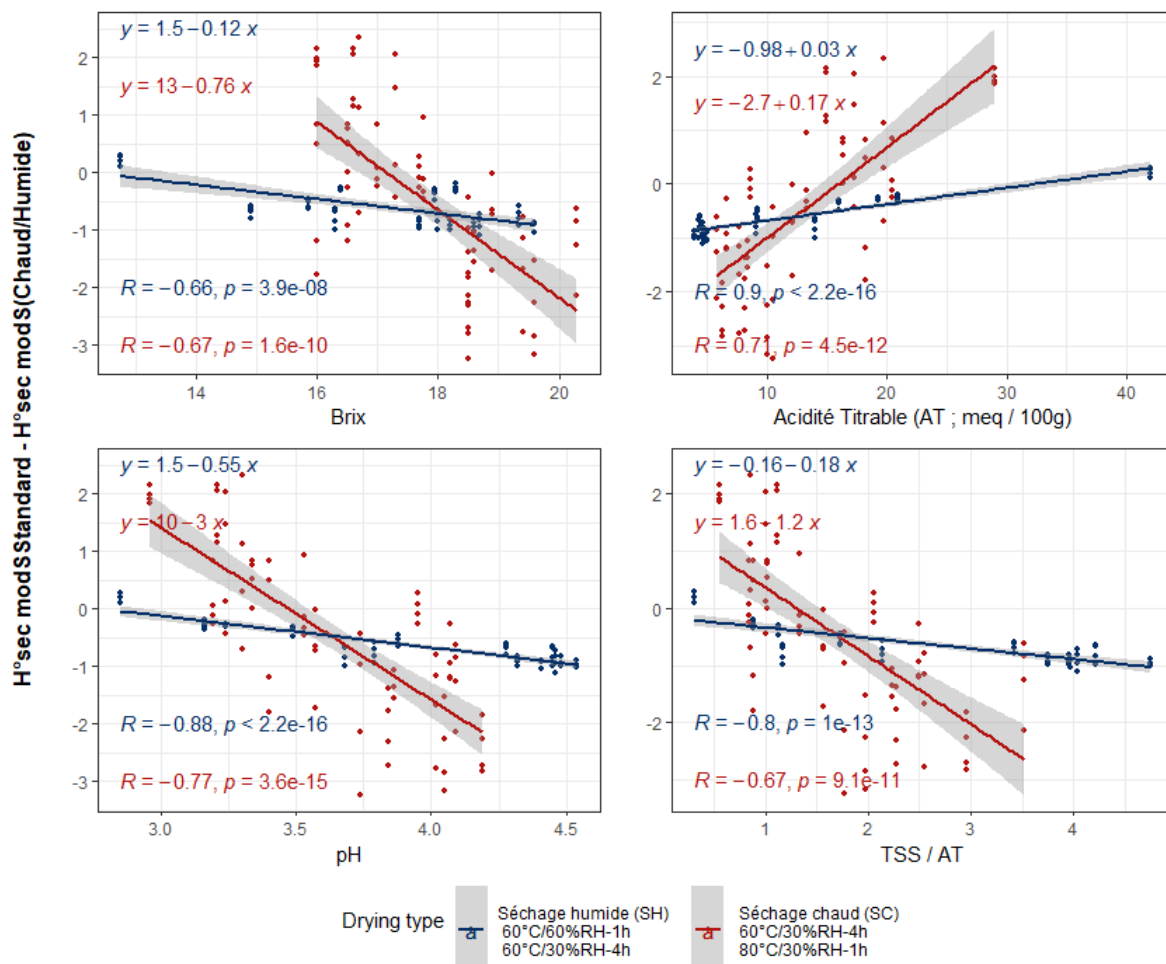


Figure 10 : Régressions ΔH° en fonction des indices physico-chimiques selon les séchages humide et chaud.

V. Conclusion

Les résultats obtenus concordent avec les savoirs empiriques des conducteurs de séchoirs de fruits : un début de séchage trop lent ou une température de fin de séchage trop élevée ne permettent pas d'obtenir une qualité optimale. Les phénomènes et réactions susceptibles d'être mis en jeu sont nombreux et complexes, dépendants majoritairement de nombreux paramètres dont notamment la composition initiale, la structure de la matière et les conditions intensives induites par le procédé (température, teneur en eau / activité de l'eau, pression partielle en oxygène...). Optimiser un séchage en conditions variables comme celui proposé par (Rivier et al., 2009) reste un défi : la démarche expérimentale est trop lourde du fait du grand nombre de

paramètres et la modélisation couplée est difficile du fait de la grande complexité des phénomènes.

Partie II. Facteurs influençant la qualité des mangues fraîches

Chapitre I. Impact du pré-récolte et du post-récolte sur la qualité des mangues fraîches du Sénégal (cv. Kent) et de l'Île de la Réunion (cv. Cogshall)

Objectifs

La première partie a démontré que la qualité de la matière première est prédominante pour l'obtention de mangues sèches naturelles de bonne qualité, dans des conditions de séchage correctes. L'objectif de cette partie est de rechercher les combinaisons de facteurs pré-récolte et post-récolte permettant d'optimiser les caractéristiques qualitatives intrinsèques des mangues fraîches. Il sera aussi recherché les délais de maturation requis pour atteindre cette qualité en fonction des paramètres étudiés. Ceci pourrait permettre aux opérateurs de séchage de piloter leur flux de production et la qualité des produits finis malgré la variabilité de la matière première subie lors des approvisionnements.

Une tentative de modélisation des cinétiques d'évolution de la qualité en fonction des paramètres pré-récolte et post-récolte a été tentée. Elle a dû être abandonnée du fait des incertitudes trop grandes sur les valeurs des critères qualité. Celles-ci viennent des difficultés d'obtention de lots homogènes à la récolte, malgré la mobilisation des techniques les récentes. Seule une analyse qualitative et quantitative de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques en fonction des paramètres pré-récolte et post-récolte a pu être menée. Les influences respectives de la variété, du stade de maturité à la récolte, de l'avancement dans la saison et de la température de maturation sur le nombre de jours de maturation, les pertes de masse, la teneur en sucres solubles, et la couleur sont présentés.

Résultats marquants

- L'hétérogénéité de maturité des lots à la récolte se retrouve pendant tout le stockage - maturation.
- Le potentiel en qualité des mangues augmente avec l'avancement dans la saison et la maturité à la récolte.
- La maturation à 35 °C permet d'obtenir des mangues plus sucrées et plus orangées.
- Les durées de maturation sont fonction du stade de maturité à la récolte, de la température de maturation, de la variété et de l'avancement dans la saison.
- La cv. 'Kent' requiert des durées de stockage – maturation plus longues que la cv. 'Cogshall' mais a des caractéristiques physico-chimiques plus intéressantes.

Impact du pré-récolte et du post-récolte sur la qualité des mangues fraîches du Sénégal (cv. 'Kent') et de l'Île de la Réunion (cv. 'Cogshall')

I. Abstract

L'impact de l'avancement dans la saison, du stade de maturité à la récolte, de la température et la durée de maturation sur la qualité des mangues fraîches a été étudié sur les cvs. 'Cogshall' de l'Île de la Réunion en France et 'Kent' au Sénégal. Les mangues ont été récoltées aux stades vert-mature et point-jaune en début, milieu et fin de saison (5 récoltes différentes). Afin de constituer des lots aussi homogènes que possible en maturité, celle-ci a été évaluée par fluorescence de la chlorophylle pour la variété Cogshall et en mobilisant l'expertise de cueilleurs professionnels pour la variété Kent. Tous les 3 à 4 jours, les évolutions de la masse, du °Brix et de la couleur ont été analysées sur 5 à 7 fruits. La maturation a été arrêtée lorsque les fruits présentaient les premiers signes de surmaturité.

Les résultats ont montré des évolutions significatives de tous les indices qualité lors de la maturation et des effets significatifs de tous les facteurs étudiés. Les mangues récoltées au stade point-jaune, comparativement aux mangues récoltées au stade vert-mature, ont eu un °Brix et un C* significativement plus élevés, un H°, un L*, des pertes de masse et une durée de maturation significativement plus faibles par rapport à celles récoltées au stade vert-mature ($p < 0.05$). Les mangues sont alors plus sucrées, avec une couleur plus orangée et une masse à la récolte et après maturation plus élevée. Des différences significatives dans les mêmes sens ressortent entre les mangues de stade vert-mature récoltées en milieu de saison par rapport à celles récoltées au même stade en début de saison, et aussi entre les mangues muries à 35 °C par rapport à celles muries à 20 °C sauf pour les pertes de masse qui sont plus élevées à 35 °C. La variété Kent présente un potentiel de qualité plus élevé que la variété Cogshall en plus d'avoir une durée de vie commerciale plus longue.

Cette étude montre ainsi qu'une gestion bien choisie du pré-récolte et du post-récolte peut permettre d'obtenir des mangues de bonne qualité et en temps souhaité selon les besoins pour la consommation de bouche ou pour la transformation.

II. Introduction

De toutes les variétés de mangues cultivées à l'Île de la Réunion (France) et au Sénégal, les cvs. 'Cogshall' et 'Kent' sont respectivement les plus importantes dans ces zones de production d'un point de vue économique car elles sont les plus exportées. La croissance en termes de volumes de production est essentiellement due à l'augmentation des vergers de type industriel pour ces deux variétés principalement destinées au marché international. Selon Siddiq et al. (2017), les pays fortement exportateurs possèdent la meilleure maîtrise des itinéraires culturels pour maximiser les rendements, des circuits de distribution et de conservation des mangues pour réduire les pertes.

Que ce soit pour la consommation – transformation locale ou pour la satisfaction des clients importateurs, la maîtrise de la conduite agronomique et des conditions de conservation - maturation est cruciale pour l'obtention de mangues de bonne qualité (Sivakumar et al., 2011). Les rejets d'achat et écarts de tri des exportateurs sont disponibles, déjà regroupés et de valeur faible voire presque nulle. Le plus souvent, ils ne répondent pas aux cahiers des charge des exportateurs telles que la maturité, le calibre ou l'esthétique. Parfois même, les mangues peuvent être conformes mais les apports sont trop importants pour être tous achetés. Rendre ces mangues acceptables pour la consommation en frais locale est difficile par contre, elles peuvent constituer une très bonne matière première pour la transformation locale. Dans les unités de séchage du Burkina Faso, après la réception des matières premières, un opérateur fait un tri visuel et tactile pour classer les mangues selon leur maturité qui définit la durée de stockage/conservation des fruits avant le séchage (Rivier et al., 2009). C'est au cours de ce stockage que la maturation des fruits a lieu, cette dernière s'accompagne d'un ensemble de modifications physiques et métaboliques (Yahia, 2011).

Ces modifications ont lieu dès le stade vert-mature, qui est celui de récolte pour les fruits destinés à l'exportation par cargo. Après dix à vingt jours de stockage au froid (10 - 12 °C) pendant le transport, la maturation des fruits peut s'effectuer à destination après l'achat par le consommateur. Toutefois, elle s'effectue de plus en plus chez l'importateur, par un passage dans des chambres de maturation (mûrisseries), dans lesquelles les fruits sont exposés à des températures de 20 - 23 °C (Sivakumar et al., 2011) pendant 7 jours avant d'être transférés chez un distributeur et mis à l'étal au stade « mur à point » (FruiTrop, 2014). A ce stade de maturité à la récolte, la mangue a stocké une quantité de métabolites qui varie en fonction de la conduite agronomique des vergers. Ces métabolites sont impliqués dans la synthèse de l'amidon et des sucres solubles (Léchaudel et al., 2005b), des acides organiques (Medlicott and Thompson,

1985), des composés aromatiques (Lalel et al., 2003) et dans le développement de la couleur (Dick et al., 2009). Ces métabolites participent à l'aspect sensoriel des produits. Les conduites des vergers influencent également l'accumulation des composés d'intérêt nutritionnels tels que les polyphénols (Ma et al., 2011), les caroténoïdes et les vitamines (Manthey and Perkins-Veazie, 2009).

Dans les paramètres pré-récolte qui affectent le métabolisme de ces composés d'intérêt sensoriel et nutritionnel, l'exposition au soleil peut être citée. Les branches fruitières recevant plus de rayonnement lumineux sont également les parties aériennes du manguier dont la disponibilité en azote est la plus importante, améliorant la capacité photosynthétique des feuilles portées par ces branches fruitières bien exposées (Léchaudel and Joas, 2007). Les mangues de ces branches ont ainsi une teneur en matière sèche, dont environ 60 % de sucres, et un volume plus importants. Il en est de même pour les mangues qui ont comptabilisé un nombre de degré-jours plus important et qui n'ont ni subi un stress hydrique, ni un défaut de disponibilité en assimilats carbonés par un nombre réduit de feuilles de la branche qui les alimentent (Léchaudel and Joas, 2007). Ces conditions de croissance sont variables au sein du même arbre et entre les arbres du même verger. Cela conduit à une variabilité très importante au sein de même lots de fruits qui reste l'une des problématiques les plus préoccupantes des filières mangues et de la recherche scientifique sur l'amélioration de la qualité de ces fruits. De nombreuses études ont tenté de réduire cette hétérogénéité en évaluant la robustesse de techniques de prédiction non destructive de la maturité des fruits tels que la fluorimétrie (Léchaudel et al., 2010), la spectroscopie proche infrarouge (Nordey et al., 2017), l'imagerie hyperspectrale (Rungpichayapichet et al., 2017), la radiographie/tomographie assistée par ordinateur (Kotwaliwale et al., 2012), le nez artificiel (Lebrun et al., 2008), le traitement d'image, ou la vision artificielle (Nagle et al., 2016), les mesures optiques, acoustiques ou d'impacts (Wanitchang et al., 2011).

Le stade de maturité du fruit à la récolte, s'il définit son potentiel de conservation, les conditions de maturation définissent sa qualité gustative (Joas et al., 2012). Des indications sur l'effet de la température de maturation sur les vitesses d'évolution des critères qualité et leur incidence sur l'appréciation sensorielle ont été mises en évidence dans la littérature (Hossain et al., 2014; Siddiq et al., 2017). Baloch and Bibi (2012) ont montré que l'acceptabilité sensorielle des mangues et la vitesse de maturation dépendaient fortement du stade de maturité à la récolte et de la température de maturation. La maturation à 30 ou 40 °C de mangues récoltées à un stade tardif, leur a permis d'obtenir sur des durées courtes un rapport sucre/acide et une teneur en

caroténoïdes plus élevés mais aussi un arôme plus prononcé. Toutefois, peu d'études ont pris en compte l'effet du stade de maturité à la récolte combiné à la température de stockage au cours de la maturation sur l'évolution de critères de qualité des mangues récoltées à différentes périodes de la saison de production pour des variétés et des pays différents.

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'effet de la variété, du stade de maturité à la récolte, de l'avancement dans la saison et de la température de maturation sur l'évolution des critères de qualité des mangues participant à l'aspect sensoriel du fruit, comme le niveau de sucres solubles, la couleur, ainsi que sur le potentiel de conservation et les pertes en masse des fruits.

III. Matériels et méthodes

III.1 *Matériel végétal*

334 mangues ont été cueillies en 5 récoltes sur deux variétés Kent et Cogshall. Les mangues de du cv. Cogshall ont été récoltées dans le verger expérimental du Cirad à Saint-Pierre (21°19'21.8"S 55°29'17.9"E) : une récolte au stade vert-mature en début de saison (Lot 1), deux récoltes au stade point-jaune en milieu (Lot 2) et en fin de saison (Lot 3). Pour la variété Kent, deux récoltes ont été effectuées dans le verger de M. MBACHE à Mboro (15°09'37.6"N 16°52'13.5"W) au stade vert-mature, en début (Lot 4) et en milieu de saison (Lot 5). L'indice de maturité à la récolte pour la variété Cogshall a été estimé à partir d'une mesure de la fluorescence maximale de la chlorophylle, réalisée au niveau de l'apex des mangues selon la méthode décrite par Léchaudel et al. (2010), à l'aide d'un fluorimètre portable FMS2 (Hansatech, King's Lynn, U.K.). Cette technique évalue richesse en chlorophylle qui baisse lors de la fin de la croissance et de la maturation. Pour la variété Cogshall, c'est au niveau de l'apex que débute la dégradation de la chlorophylle et que le début du jaunissement du fruit est visible, correspondant au début de la crise climactérique. Ce stade de maturité spécifique à la variété Cogshall est nommé le stade point-jaune (Rosalie et al., 2018). Au stade vert-mature, la fluorescence maximale est comprise entre 1050 et 1175 et elle est inférieure à 950 pour le stade point-jaune (Léchaudel et al., 2010). Pour la variété Kent, les mangues cueillies ont été choisies selon l'expertise d'un cueilleur professionnel en respectant le cahier des charges pour l'exportation des mangues en cargo.

III.2 *Cinétiques de maturation et analyse de la qualité*

Chaque lot de mangue a été séparé en deux groupes, mis en maturation respectivement à 20 °C et 35 °C. Ainsi, 10 cinétiques de maturation ont été effectuées sur 5 durées, ajustées en fonction de l'évolution visuelle des fruits jusqu'aux premiers signes de surmaturité. A la récolte ainsi

qu'à chaque prélèvement lors des cinétiques, 5 mangues de chaque modalité ont été pesées, lavées dans de l'eau chlorée (Hypochlorite de sodium 0,6 %) pendant 5 minutes, puis rincées 3 fois à l'eau claire. Après la pesée, les mangues ont été épluchées, chaque joue découpée à la mandoline sur la longueur pour récupérer 2 tranches de 4 mm pour la mesure de la couleur. 3 mesures par tranche ont été collectées à l'aide d'un chromamètre (Minolta CR-400, Tokyo, Japan) et les données analysées dans l'espace cylindrique « CIELCH » avec la luminance L^* et les coordonnées polaires C^* (Chroma Eq. 6) et H° (Hue angle Eq. 7).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \text{ (Eq. 6); } H^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \text{ (Eq. 7)}$$

La pulpe résiduelle a été collectée puis broyée à l'azote liquide puis conservée à -80 °C. L'indice réfractométrique (en °Brix) a été mesuré sur la pulpe décongelée avec un réfractomètre portable (PAL- α , Atago, Tokyo, Japan) afin d'estimer la teneur en sucres solubles de la pulpe.

III.3 *Analyses statistiques*

Des analyses de variance ont été effectuées pour évaluer l'effet de la variété, du stade de maturité à la récolte, de l'avancement dans la saison, et de la température de maturation sur le nombre de jours de maturation, la masse fraîche du fruit, ses pertes de masses, le °Brix et la couleur de la pulpe (L^* , C^* et H°). Une procédure pas à pas a permis de regrouper ou dissocier les données selon la significativité des facteurs étudiés. Par exemple si l'effet de l'avancement dans la saison est significatif, les données des mangues de stade point-jaune sont dissociées en point-jaune milieu de saison et point-jaune fin de saison puis comparées individuellement au stade vert-mature. La même procédure a été appliquée lors de la comparaison des données physico-chimiques entre les deux variétés pour regrouper ou dissocier des données de différentes maturités à la récolte et différents avancements dans la saison.

L'évolution de chaque critère de qualité a été analysée au cours de la maturation pour chaque lot de fruits et à chaque température de maturation. A partir du jour où les valeurs de ces paramètres n'évoluent plus significativement dans le temps, elles sont considérées comme valeurs maximales (°Brix, perte de masse et C^*) ou minimales (H° et L^*) et correspondent aux valeurs de fruits à un stade « mûr », pour une consommation en frais (« ready-to-eat stage, (Nassur et al., 2015)) ou une transformation. Pour les analyses de variance effectuées à ce stade fruit « mûr », la même procédure de tests par étape est réalisée, en débutant toutefois par l'effet de la température de maturation pour chaque facteur pré- et post-récolte étudié. Le test de Tukey a été utilisé pour effectuer les comparaisons multiples afin de détecter si les différences entre les valeurs moyennes des paramètres de qualité sont significatives selon le facteur étudié. Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R (R Core Team, 2019).

IV. Résultats

Les critères de qualité mesurés à la récolte et après la maturation au stade fruit « mûr », sont regroupés dans les tableaux 4, 5 et 6 qui présentent les résultats des tests de significativité des effets des facteurs étudiés.

Pour les mangues du cv. Cogshall récoltées au stade point-jaune, l'avancement dans la saison (lots 2 et 3, respectivement milieu et fin de saison) ne génère pas de différences significatives pour les différents critères de qualité mesurés à la récolte (Tableau 4). Les données des lots 2 et 3 peuvent alors être groupées pour les autres tests à la récolte. Il n'en est pas de même pour les mangues du cv. Kent récoltées au stade vert-mature. Les tests de différences entre les lots 4 et 5 montrent, à la récolte, des différences hautement significatives pour tous les critères de qualité (Tableau 4).

Pour tous les critères de qualité mesurés après la période de maturation, les effets de la température de stockage au cours de la maturation sont significatifs quels que soient les facteurs pré-récolte ; les données ne doivent alors pas être regroupées. Contrairement à l'analyse à la récolte, l'avancement dans la saison a un effet significatif sur la qualité des mangues Cogshall mûres récoltées au stade point-jaune (PJ milieu $\neq$ PJ fin ; $p > 0.05$). De ce fait, l'effet du stade de maturité à la récolte a été analysé entre les mangues Cogshall récoltées au stade vert-mature, en début de saison (lot 1), et celles récoltées au stade point-jaune en milieu de saison (lot 2).

IV.1 *Effet sur la masse du fruit à la récolte et les pertes en masse lors de la maturation*

La masse des mangues à la récolte augmente de manière significative avec l'avancement dans la saison pour la variété Kent ($p > 0.05$) uniquement (Tableau 4). Pour la variété Cogshall, elle augmente de manière significative avec le stade de maturité à la récolte. Les mangues de la variété Kent ont un calibre significativement ($p > 0.05$) plus important que celui des mangues Cogshall. Lors de la maturation, les pertes en masse augmentent de manière linéaire ($R > 0,9$; $p < 10^{-8}$) avec le nombre de jours de maturation (Tableau 5, Figure 11) et sont nettement très dépendantes de la température de maturation. Les mangues muries à 35 °C perdent significativement plus d'eau qu'à 20 °C quel que soit l'itinéraire pré-récolte et post-récolte que les fruits ont suivi (Tableau 5).

Tableau 4 : Impact du pré-récolte sur la masse, le °Brix et la couleur des mangues à la récolte

Factors				Mass (g)				Brix				L*				H°				C*			
Batch number	Variety	Harvest Stage	Maturity at harvest	Mean ± SE (g)	HP	MSH	VAR	Mean ± SE (°Brix)	HP	MSH	VAR	Mean ± SE	HP	MSH	VAR	Mean ± SE (°)	HP	MSH	VAR	Mean ± SE	HP	MSH	VAR
1	Cogshall Réunion Fluo	Early	VM	421.7 ± 86.2		B	B	8.4 ± 1.1		B	A	87.0 ± 1.2		A	A	101.9 ± 1.7		A	A	29.2 ± 7.9		B	B
2		Mid	PJ	446.2 ± 62.6	A	A		13.7 ± 4.8	A	A		78.7 ± 5.4	A	B		93.2 ± 3.2	A	B		62.0 ± 10.5	A	A	
3		Late	PJ	467.1 ± 98.3	A			12.6 ± 3.4	A			80.1 ± 6.4	A			94.9 ± 5.1	A			51.6 ± 20.2	A		
4	Kent Sénégal Ceuilleur	Early	VM	546.8 ± 73.5	b		A	6.0 ± 0.5	b		B	86.1 ± 0.7	a		A	101.7 ± 1.7	a		A	43.7 ± 3.9	b		A
5		Mid	VM	551.8 ± 115.5	a			6.8 ± 0.3	a			83.1 ± 0.7	b			91.5 ± 1.5	b			61.3 ± 4.0	a		

Les valeurs affichées représentent les moyennes ± l'erreur standard. Les différentes lettres par colonne, par type de lettre et par niveau de gris représentent les différences significatives ($p < 0.05$). Studied effects: HP: harvest period; MSH: maturity stage at harvest, VAR: variety. (1) Données à la récolte des lots 2 et 3 regroupées car les différences entre leurs valeurs moyennes ne sont pas significatives

Tableau 5 : Effet du pré-récolte et post-récolte sur les pertes de masse, le °Brix et la durée de maturation

Factors					Mass loss					Brix					Ripening days				
Batch number	Variety	Harvest Stage	Maturity at harvest	Ripening T°C	Mean ± SE (%)	RT	HP	MSH	VAR	Mean ± SE (°Brix)	RT	HP	MSH	VAR	Mean ± SE (days)	RT	HP	MSH	VAR
1	Cogshall Réunion Fluo	Early	VM	20	3.2 ± 0.3	B		A	B	15.7 ± 1.5	B		A	A	10 ± 2	A		A	B
				35	12.3 ± 1.5	A		a	b	17.4 ± 1.1	A		a	b	8 ± 1	B		a	b
2		Mid	PJ	20	2.0 ± 0.5	b	B	B		16.8 ± 2.6	b	A	A		5 ± 3	a	A	B	
				35	7.8 ± 0.6	a	a	b		18.5 ± 1.1	a	b	b		4 ± 1	b	a	b	
3		Late	PJ	20	2.6 ± 0.4	B	A			17.6 ± 1.8	B	A			5 ± 1	A	A		
				35	7.2 ± 1.4	A	a			19.3 ± 1	A	a			4 ± 1	B	a		
4	Kent Sénégal Ceuilleur	Early	VM	20	8.9 ± 0.7	b	A		A	15.5 ± 1.4	b	B		A	14 ± 2	a	A		A
				35	20.1 ± 2.4	a	a		a	18.5 ± 0.6	a	b		a	10 ± 0	b	a		a
5		Mid	VM	20	7.6 ± 0.6	β	B			18.0 ± 1.6	β	A			12 ± 2	α	B		
				35	15.5 ± 1.9	α	b			20.0 ± 1.5	α	a			8 ± 1	β	b		

Les valeurs affichées représentent les moyennes ± l'erreur standard. Les différents types de lettres par colonne et par niveau de gris représentent les différences significatives ($p < 0.05$). Studied effects: RT: Ripening temperature; HP: harvest period; MSH: maturity stage at harvest, VAR: variety.

Tableau 6 : Effet du pré-récolte et post-récolte sur la couleur (L*, H° et C*) lors de la maturation

Factors					L*					H°				C*					
Batch number	Variety	Harvest Stage	Maturity at harvest	Ripening T°C	Mean ± SE	RT	HP	MSH	VAR	Mean ± SE (°)	RT	HP	MSH	VAR	Mean ± SE	RT	HP	MSH	VAR
1	Cogshall Réunion Fluo	Early	VM	20	72.6 ± 2.9	A		A	A	90.3 ± 1.8	A		A	A	64.2 ± 2.9	A		A	B
				35	72.6 ± 4.3	A		a	a	87.2 ± 3.2	B		a	a	64.9 ± 6.4	A		b	a
2		Mid	PJ	20	70.7 ± 2.4	a	A	A		90.0 ± 2.2	a	A	A		66.8 ± 5.4	b	A	A	
				35	70.7 ± 2.1	a	b	a		85.7 ± 1.5	b	a	a		73.2 ± 3.0	a	a	a	
3		Late	PJ	20	68.6 ± 5.0	B	A			90.7 ± 3.7	A	A			64.0 ± 9.0	A	A		
				35	72.9 ± 2.6	A	a			86.7 ± 2.4	B	a			66.8 ± 4.5	A	b		
4	Kent Sénégal Ceuilleur	Early	VM	20	72.3 ± 2.1	a	A		A	79.6 ± 2.4	a	A		B	69.2 ± 2.8	a	A		A
				35	72.8 ± 1.5	a	a		a	78.6 ± 1.8	a	a		b	65.0 ± 4.0	b	b		a
5		Mid	VM	20	72.4 ± 2.2	α	A			80.1 ± 3.1	α	A			69.2 ± 1.5	α	A		
				35	70.9 ± 2.1	β	b			76.3 ± 2.2	β	b			67.8 ± 1.0	β	a		

Les valeurs affichées représentent les moyennes ± l'erreur standard. Les différents types de lettres par colonne et par niveau de gris représentent les différences significatives ($p < 0.05$). Studied effects: RT: Ripening temperature; HP: harvest period; MSH: maturity stage at harvest, VAR: variety

Bien qu'elles augmentent de taille avec l'avancement dans la saison, les mangues récoltées à un moment plus avancé dans la saison perdent significativement ($p > 0,05$) moins d'eau que celles récoltées plus tôt dans la saison. Il en est de même avec la baisse des pertes en eau avec la maturité à la récolte ($p > 0,05$) que ce soit à 20 °C ou à 35 °C. De calibres plus gros, les mangues de la variété Kent perdent significativement plus d'eau que de la variété Cogshall quelle que soit la température de maturation (jusqu'à 20 % de leur masse à 35°C).

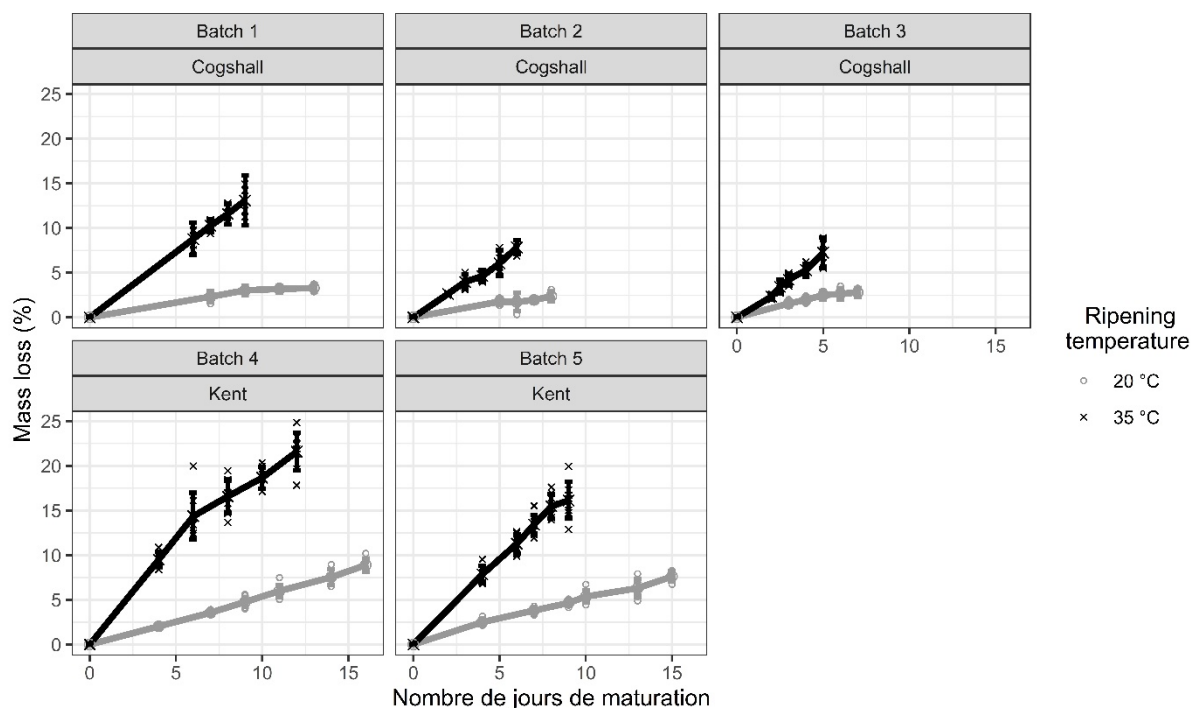


Figure 11 : Evolution des pertes de masse durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.

IV.2 *Teneur en solides solubles (°Brix)*

Les niveaux de solides solubles accumulés dans les fruits à la récolte et dans les fruits mûrs en fonction des paramètres pré-récolte et post-récolte sont présentés dans les tableaux 4 et 5. A la récolte, le °Brix augmente de manière significative ($p > 0,05$) avec l'avancement dans la saison pour la variété Kent récoltée au stade vert-mature. Pour la variété Cogshall récoltée au stade point-jaune, le °Brix n'est pas influencé par l'avancement dans la saison. Par contre, le stade de maturité à la récolte a un effet significatif sur ce critère de qualité, les mangues de ce stade sont plus sucrées à la récolte que celles du stade vert-mature ($p > 0,05$). Pour une récolte au stade vert-mature, la variété Cogshall est significativement plus sucrée que la variété Kent à la récolte ($p > 0.05$) (Tableau 4).

La figure 12 présente l'évolution du °Brix lors de la maturation en fonction des paramètres pré-récolte et post-récolte. Le °Brix augmente pour atteindre un maximum puis reste constant ou diminue, en fonction du lot et de la température de maturation. La maturation à 35 °C entraîne une augmentation du °Brix significativement plus importante ($p > 0,05$) qu'à 20 °C quels que soient la variété, le stade de récolte et l'avancement dans la saison (Tableau 5). A cette température, l'augmentation du °Brix avec le stade de maturité à la récolte et avec l'avancement dans la saison est significativement plus accentuée. A l'inverse des mesures à la récolte et dans le cas d'une maturation à 35 °C, les fruits mûrs de la variété Kent sont plus sucrés que ceux de la variété Cogshall. A 20 °C, les mêmes tendances entre variétés sont observées en fonction l'avancement dans la saison et du stade de maturité mais les différences ne sont pas significatives.

IV.3 *Effet sur la couleur de la pulpe*

L'évolution des indices colorimétriques en fonction du temps décrit une sigmoïde décroissante pour L^* et H^o et croissante pour C^* (Figure 13, 14 et 15). Elle est complète, avec un plateau initial, pour des mangues de stade vert-mature de la variété Kent. Lors de la maturation, la luminance et l'angle de teinte des mangues baissent alors que la saturation augmente. Les fruits passent ainsi du vert-jaune clair au jaune foncé - orange foncé en fonction de l'itinéraire post-récolte.

IV.3.1 *Luminance L^**

A la récolte la luminance des mangues est significativement plus faible avec l'avancement dans la saison pour la variété Kent mais ce paramètre pré-récolte n'a pas d'effet pour la variété Cogshall (Tableau 4). La luminance baisse aussi de manière significative avec le stade de maturité. Il n'y a pas de différences significatives entre les luminances des deux variétés au stade vert-mature en début de saison. Pendant la maturation, la baisse de la luminance est significativement plus forte à 35 °C qu'à 20 °C pour la variété Kent, et ceci est beaucoup moins marqué pour la variété Cogshall (Figure 13). Les courbes sont assez proches et l'effet de la température de stockage est significatif uniquement pour le lot 3 (récolte point-jaune tardive). Les effets de l'avancement dans la saison et du stade de maturité à la coupe constatés à la récolte sont fortement accentués par la maturation à 35 °C contrairement à celle à 20 °C qui les atténue. Comme observé à la récolte, les luminances des 2 variétés ne sont pas significativement différentes quelle que soit la température de maturation (Tableau 6).

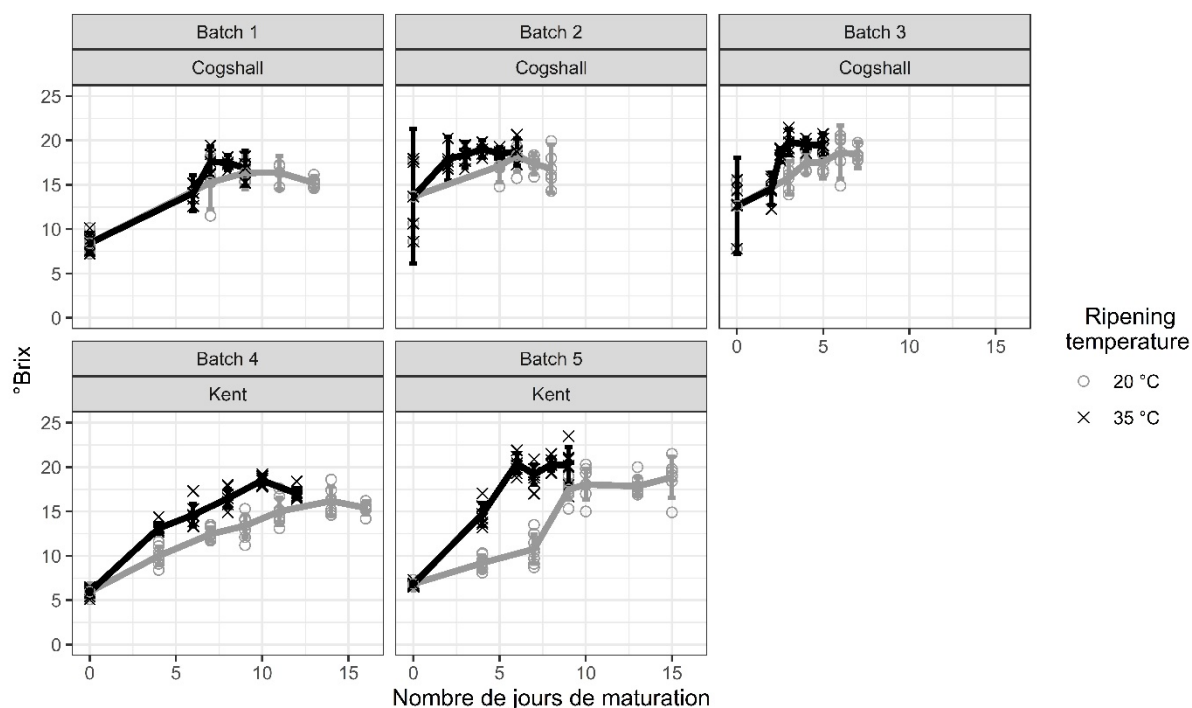


Figure 12 : Evolution du °Brix durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.

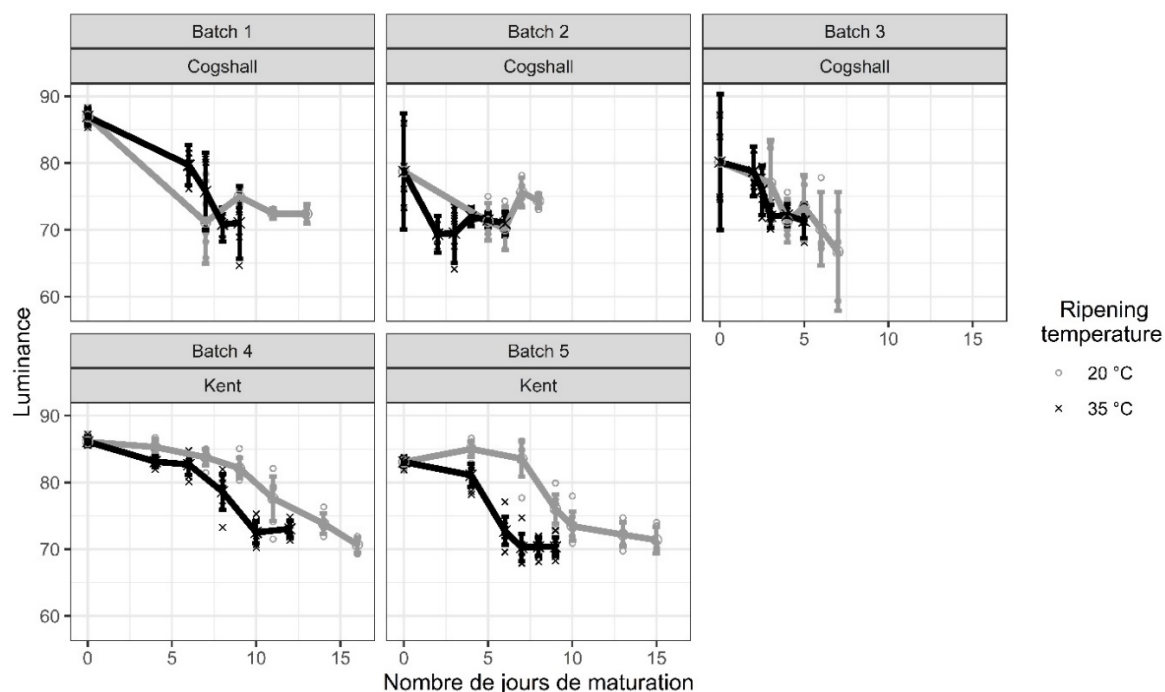


Figure 13 : Evolution de la luminance durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.

IV.3.2 Angle de teinte H°

L'angle de teinte à la récolte diminue de manière significative avec l'avancement de la saison pour la variété Kent et avec le stade de maturité pour la variété Cogshall (Tableau 4). Les 2 variétés ont le même H° pour une récolte vert-mature, mais après la maturation, la variété Kent a un H° significativement plus faible quelle que soit la température de maturation, indiquant une couleur plus orangée de la pulpe de cette variété. Les mangues muries à 35 °C ont un H° significativement plus faible que celles muries à 20 °C quelle que soit la combinaison de facteurs, sauf pour le lot 4, les différences ne sont pas significatives.

A 35 °C, l'avancement dans la saison a un impact significatif sur la baisse du H° uniquement pour les mangues de la variété Kent. La récolte de mangues à une maturité à la récolte plus avancée n'entraîne pas une baisse significative du H° lors de la maturation des mangues de la variété Cogshall (Tableau 6).

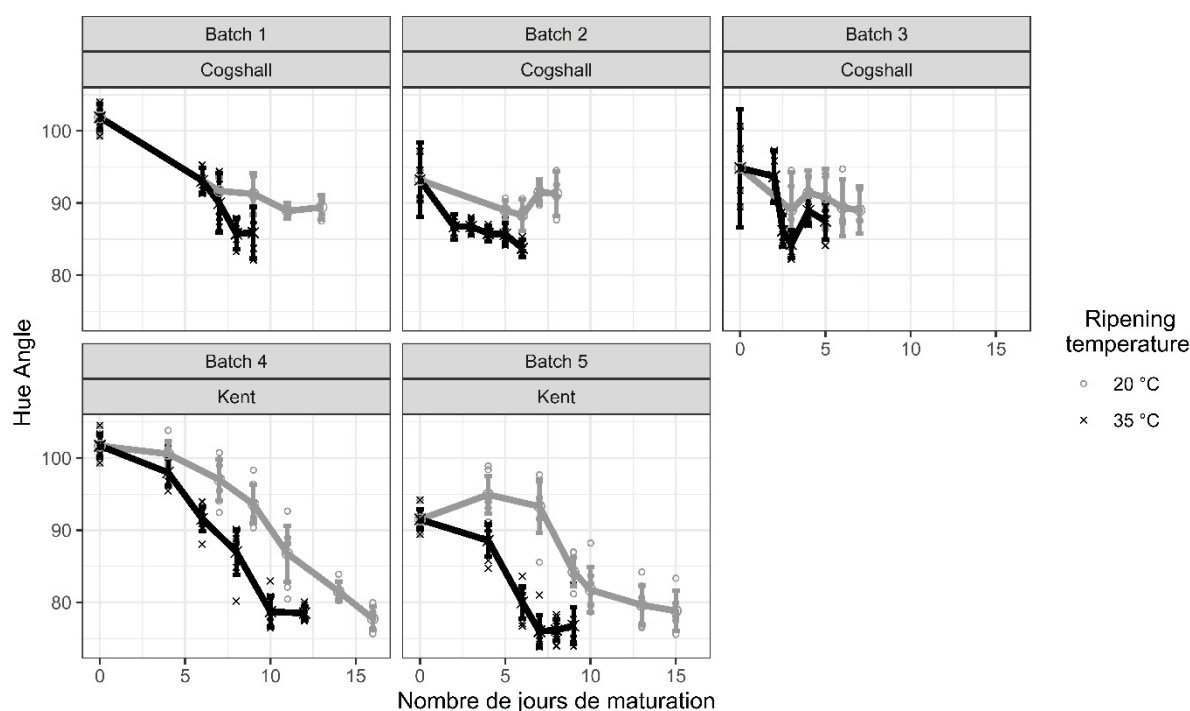


Figure 14 : Evolution de l'angle de teinte durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.

IV.3.3 Chroma C^*

La saturation à la récolte augmente de manière significative avec l'avancement dans la saison pour la variété Kent et la maturité à la récolte pour la variété Cogshall (Tableau 4). La variété Kent a un C^* plus élevé que la variété Cogshall à la récolte et lors de la maturation (Tableau

6). En pleine saison, le C* augmente de manière significative avec la température de maturation, pour la variété Cogshall mais ne varie pas en début et en fin de saison. Le C* baisse avec l'augmentation de la température de maturation pour la variété Kent. Pour la variété Cogshall, la tendance est inversée, avec des valeurs de C* plus élevées pour les mangues conservées et muries à 35 °C, et particulièrement pour les récoltes au stade de maturité point-jaune (Tableau 6).

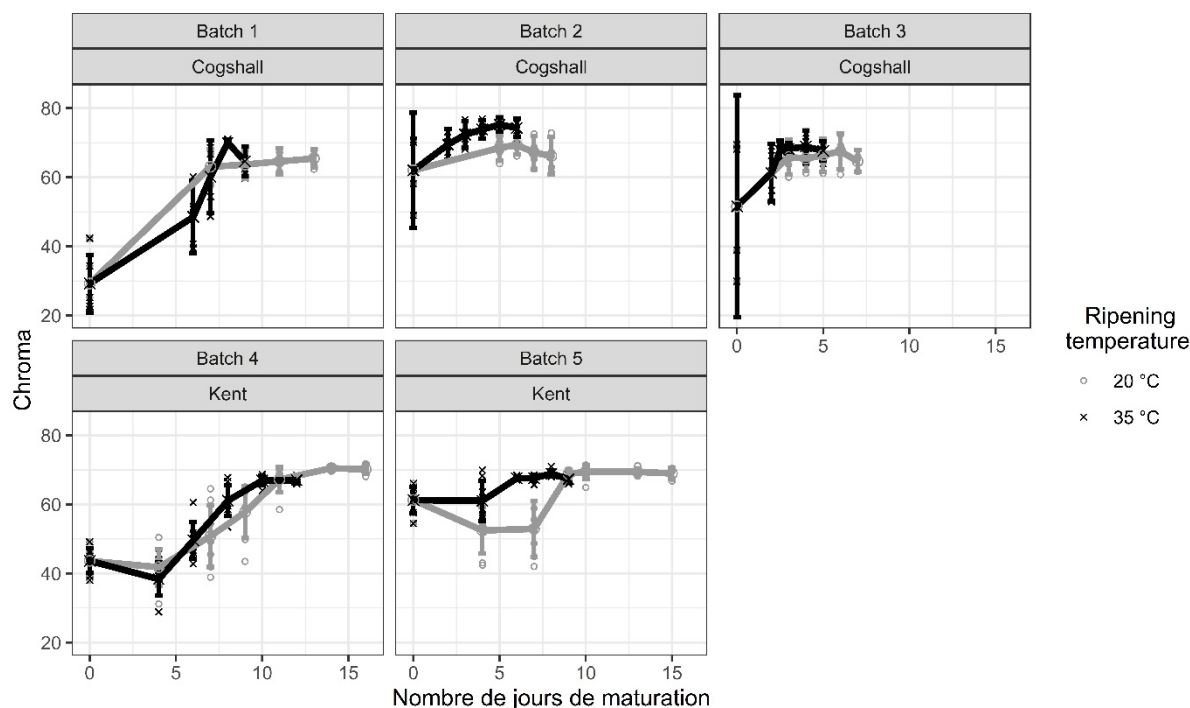


Figure 15 : Evolution du Chroma durant la maturation en fonction des paramètres de la variété et des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les valeurs représentent les moyennes sur 5 à 7 fruits. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %.

IV.4 *Effet sur la durée de maturation*

Quelle que soit la variété, l'avancement dans la saison et la maturité à la récolte, la maturation à 35 °C entraîne une baisse significative du nombre de jours de maturation par rapport à 20 °C (Tableau 6, Figure 16). Quelle que soit la température, l'avancement dans la saison entraîne une baisse significative du nombre de jours de maturation pour les mangues récoltées au stade vert-mature (Kent) et n'a aucun effet sur les mangues récoltées point-jaune (Cogshall). La durée de maturation diminue de moitié lorsque les mangues sont récoltées au stade point-jaune par rapport à la récolte au stade vert-mature que ce soit à 20 ou à 35 °C pour cv. Cogshall. La variété Kent a une durée de maturation significativement plus longue que la variété Cogshall quelle que soit la température de maturation.

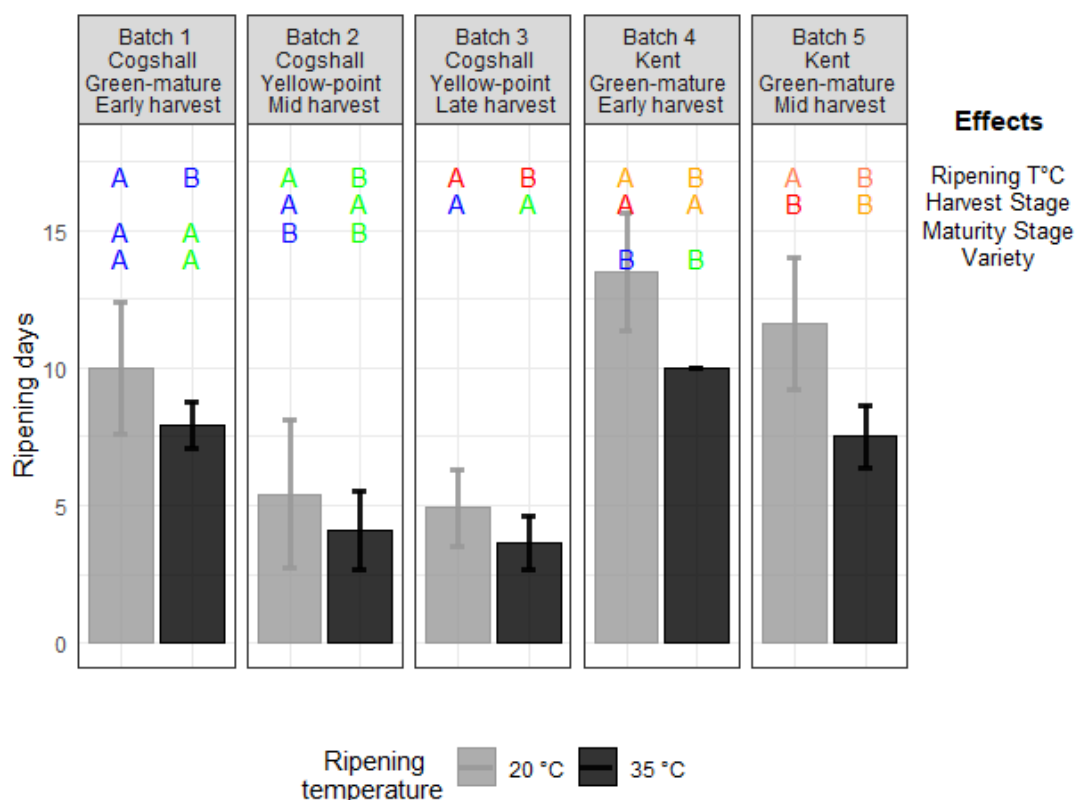


Figure 16 : Evolution du nombre de jours de maturation en fonction des lots muris à 20 °C et à 35 °C. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type à 95 %. Les différentes lettres par ligne (effet d'un facteur pré-récolte ou post-récolte), par couleur représentent les différences significatives ($p < 0.05$).

V. Discussion

V.1 Effets de la température de maturation

La connaissance de la durée de maturation des mangues en fonction de la température de maturation et de son interaction avec les paramètres pré-récolte est importante pour prédire la disponibilité des fruits et la qualité lors de la vente pour la consommation en frais ou pour la transformation. L'augmentation de la température a entraîné un raccourcissement de la durée de maturation (Tableau 5). Ceci est valable pour les variétés Kent et Cogshall, qu'elles soient récoltées vert-mature ou point-jaune, en début, milieu ou fin de saison. Beaucoup d'autres études ont montré la même tendance à la baisse du nombre de jours de maturation avec l'élévation de la température du fait de l'accélération des métabolismes primaires et secondaires, indépendamment de la variété et des paramètres pré-récolte (Baloch and Bibi, 2012; Noiwan et al., 2017; Penchaiya et al., 2020).

Lors de la maturation, la dégradation de l'amidon en sucres solubles, accentuée par l'activité plus forte des amylases aux températures élevées (Hossain et al., 2014), entraîne une

augmentation de la teneur en solides solubles (Li et al., 2020). Notre étude montre qu'elle est plus rapide et plus complète à 35 °C qu'à 20 °C car à partir d'un même lot avec des mangues de caractéristiques similaires, le °Brix maximum est plus élevé à 35 °C. Ces résultats confirment les travaux de Gill et al. (2017) qui ont aussi trouvé que le °Brix était plus élevé aux températures de maturation élevée.

La baisse de l'angle de teinte était aussi plus forte à 35 °C qu'à 20 °C. Cette baisse du H° pourrait être liée à une augmentation de la teneur en caroténoïdes dans la pulpe, comme le suggère la corrélation négative observée entre ces deux paramètres pour différentes variétés de mangues (Ornelas-Paz et al., 2008; Rosalie et al., 2019). Vazquez-Salinas and Lakshminarayana (1985) ont trouvé que l'augmentation de la température de maturation entraînait une augmentation de la teneur en caroténoïdes. Cela vient probablement de l'augmentation de la température de maturation qui entraîne une augmentation de l'activité des enzymes impliquées dans la synthèse des caroténoïdes mais aussi l'augmentation du niveau de transcription des gènes impliqués (Fu et al., 2019).

Pour la variété Kent, les mangues muries à 20 °C ont un Chroma plus élevé que celles muries à 35 °C. La couleur des mangues est plus pure à 20 °C. Si les mangues muries à 35 °C ont une couleur qui tend vers l'orange, celle des mangues muries à 20 °C tend vers un jaune qui devient de plus en plus foncé (Diop et al., 2021). Ce changement de la couleur ressemble à celui des mangues de la variété Namdokmai Sithong dont l'évolution du jaune clair vers le jaune foncé s'accompagne d'une augmentation conjointe de la valeur du C* et de la teneur en caroténoïdes (Rungpichayapichet et al., 2015).

A 35 °C, les pertes en eau sont 2 à 4 fois plus élevées qu'à 20 °C quelle que soit la combinaison de facteurs pré-récolte. L'augmentation de la température de maturation entraîne une augmentation du gradient de pression de vapeur entre la surface de la mangue et l'air ambiant environnant, conduisant à un niveau de transpiration plus important aux températures élevées (Léchaudel et al., 2013; Nordey et al., 2014c). D'autres études, sans étudier les caractéristiques physiques de la peau, ont montré que cette tendance à la hausse dépendait de la température de maturation (Patil et al., 2016; Vazquez-Salinas and Lakshminarayana, 1985).

V.2 Effets de l'avancement dans la saison sur la qualité à la récolte et lors de la maturation

Comme pour beaucoup de fruits, la qualité évolue en fonction de l'avancement dans la saison. Pour nos critères de qualité, c'est le début de saison qui ressort comme différent. Ainsi, à la récolte, pour la variété Kent, les mangues récoltées en milieu de saison ont un meilleur potentiel

qualité qu'en début de saison même s'ils ont le même indice de maturité à la récolte. Joas et al. (2012) ont montré que deux fruits avec le même indice de maturité à la récolte peuvent avoir des âges physiologiques différents, ce qui influence la qualité finale. Les effets de l'avancement dans la saison s'accroissent fortement pendant la maturation.

D'après Tandon and Kalra (1983), l'accumulation d'amidon et l'activité de l'amylase augmenteraient avec l'avancement dans la saison. Ainsi, l'hydrolyse de l'amidon est plus rapide et les fruits obtenus sont plus sucrés. En cohérence avec nos résultats, Dick et al. (2009) ont trouvé que les mangues cv. Kent récoltées en milieu et fin de saison sont significativement plus sucrées et ont une durée de maturation significativement plus courte que celles récoltées en début de saison. De plus, les mangues de la variété Kent récoltées plus tardivement sont aussi plus orangées et une couleur plus pure (H° significativement plus faible et C^* significativement plus élevée). La même tendance à la hausse du a^* , du b^* (respectivement négativement et positivement corrélés au H° et au C^*) et de la teneur en caroténoïdes avec l'avancement dans la saison a été observée par Kour et al. (2018).

Dans notre étude, les fruits récoltés plus tardivement dans la saison, perdent significativement moins d'eau que ceux récoltés précocement quelle que soit la variété. Konan Koffi et al., 2021 ont trouvé des résultats similaires qui montraient que les mangues récoltées plus tardivement dans la saison ont des pertes de masse significativement plus faibles que celles récoltées plus tôt. La diminution de la perméabilité cuticulaire avec l'âge du fruit pourrait expliquer la réduction des pertes en eau pour les mangues récoltées plus tardivement dans la saison (Nordey et al., 2014c).

Lors de la maturation, les mangues de la variété Cogshall récoltées en milieu et en fin de saison ont la même durée de maturation. La différence avec les Kent est que les Cogshall récoltées au stade point-jaune, qu'importe le moment de la récolte dans la saison, ont déjà débuté leur crise climactérique et sont sur la phase d'accroissement exponentiel de leur intensité respiratoire (Joas et al., 2009). Ce qui fait que lors de la maturation, il n'y a pas de temps de latence pour que les fruits débutent les changements biochimiques conduisant à des fruits murs. Ainsi, quel que soit le moment où elles ont été récoltées, elles arrivent à maturité en même temps, au bout de 5 jours à 20 °C, et 4 jours à 35 °C.

V.3 Effets de la maturité à la récolte sur la qualité à la récolte et lors de la maturation

Les résultats concernant la maturité à la coupe font bien ressortir la forte évolution des fruits dès la récolte.

Dès la récolte et après la maturation, les mangues de stade point-jaune sont ainsi plus sucrées que les mangues de stade vert-mature en adéquation avec les résultats de Joas et al. (2013). Leurs résultats montrent également que la teneur en matière sèche de la pulpe (composée à 60 % de sucres) est plus importante pour les mangues de stade point-jaune. Cette différence de teneur en matière sèche pourrait expliquer les niveaux de °Brix et les masses plus faibles pour les mangues récoltées au stade vert-mature dans nos expériences. Le stade point-jaune, spécifique à la variété Cogshall, est un stade de maturité plus avancé que le stade vert-mature (Léchaudel et al., 2010). C'est le stade pour la commercialisation dans le marché local à l'Île de la Réunion. Il est intéressant du fait que la mangue a atteint un niveau d'accumulation des métabolites très important dont les teneurs après maturation seront similaires à une mangue cueillie sur l'arbre à pleine maturité (Rosalie, 2015). Comme décrit précédemment, les mangues de point-jaune ont déjà débuté leur crise climatérique à la récolte contrairement aux mangues de stade vert-mature qui nécessitent un temps de latence plus long. Ainsi la durée de maturation est plus courte aux stades de maturité avancées tel que décrit par Medlicott et al. (1990).

Au stade point-jaune, les mangues ont une coloration de la peau très orangée au niveau de l'apex de la mangue (moins de 10 % de la surface). La dégradation de la chlorophylle au profit de la synthèse des caroténoïdes a ainsi débuté dès la récolte (Léchaudel et al., 2010). La couleur plus orangée des mangues récoltées au stade point-jaune et muries à 35 °C par rapport aux mangues récoltées au stade vert-mature pourrait ainsi être due à la teneur plus élevée en caroténoïdes tel que montré par Joas et al. (2013). L'augmentation conjointe de l'activité des enzymes impliqués dans les voies de biosynthèse des caroténoïdes avec la maturité du fruit (Ma et al., 2018) et la température de maturation (Fu et al., 2019) pourrait expliquer ces différences.

V.4 Effets de la variété sur la qualité à la récolte et lors de la maturation

Des différences entre les variétés sont ressorties. A la récolte, pour un stade de commercialisation export vert-mature de début de saison, les mangues de la variété Cogshall ont un °Brix et un C* significativement plus élevés que ceux des mangues de la variété Kent. Cette différence de niveau de sucres peut être liée à un stade vert-mature plus avancé pour les mangues Cogshall, car ce stade s'étale en moyenne de 90 à 120 jours après floraison chez la mangue (Léchaudel and Joas, 2006). Les fruits de la variété Kent ont une masse

significativement plus élevée, comme relevé dans des études précédentes (Rosalie et al., 2013). La luminance L^* et la teinte H° des deux variétés ne présentent pas de différences significatives. Les valeurs sont très élevées et correspondent bien à des pulpes de mangue n'ayant pas débuté leur processus de coloration, de couleur jaune clair (Diop et al., 2021).

Quelle que soit la température de maturation, la variété Kent a une durée de maturation significativement plus longue (4 jours de plus à 20 °C et 2 jours de plus à 35 °C) que la variété Cogshall. La variété Kent est très appréciée sur le marché international en partie grâce à sa longue durée de vie marchande, tout comme les variétés Keitt et Tommy Atkins (Bally et al., 2009). Cependant elle perd significativement plus d'eau (2 à 3 fois plus selon la température de maturation) que la variété Cogshall. Ces différences pourraient être dues aux facteurs environnementaux de croissance qui déterminent en partie le niveau de perte en eau post-récolte (Leonardi et al., 2000; Montanaro et al., 2012) mais aussi aux différences physiologiques entre les variétés (Lawson et al., 2019). Dans notre étude, les pertes de masse de la variété Kent (jusqu'à 20%) sont à peu près égales à celles de la variété Palmer (Cosme Silva et al., 2017), et celles de la variété Cogshall (inférieures à 5 %) à celles de la variété Tommy Atkins (Baldwin et al., 1999; Mohammed and Brecht, 2002).

Après une maturation à 35 °C, la variété Kent atteint un °Brix maximal significativement supérieur ainsi qu'un H° minimal significativement inférieur à ceux de la variété Cogshall. A cette température, les mangues fraîches de variété Kent sont plus sucrées, ont une couleur plus orangée que celles de la variété Cogshall. Elles seraient donc plus riches en caroténoïdes que la variété Cogshall car il existe une corrélation négative entre la teneur en caroténoïdes et la teinte H° (Ornelas-Paz et al., 2008; Rosalie et al., 2019). Ce résultat a été confirmé par (Rosalie et al., 2013b) qui a montré que la variété Kent avait une teneur en caroténoïdes significativement supérieure à celle de la variété Cogshall. Après une maturation à 20 °C, les deux variétés ont la même valeur de °Brix et de luminance, mais la variété Kent a un H° plus faible et un C^* plus élevé, donnant ainsi une couleur plus orangée et plus pure que celle de la variété Cogshall. Ces différences de couleur avaient été notées entre ces deux variétés dans une étude comparative (Rosalie et al., 2013). Par conséquent, quelle que soit la température de maturation, les mangues récoltées vert-mature en début de saison de la variété Kent ont des caractéristiques qualité plus intéressantes après la maturation par rapport à celles de la variété Cogshall, contrairement à (Rosalie et al., 2013) qui a trouvé que les deux variétés de type floridienne ont les mêmes caractéristiques biochimiques après la maturation.

VI. Conclusion

Lors de la maturation des mangues, le °Brix et le C* ont augmenté alors que la masse des fruits, le H° et le L* baissaient, quel que soit l'itinéraire pré-récolte et post-récolte des mangues étudiées. Les variations des indices de la qualité et la durée pour arriver aux valeurs optimales ressortent comme fortement dépendantes de la variété, du stade de maturité à la récolte, de l'avancement dans la saison et de la température de maturation.

Chapitre II. Evolution de la qualité de mangues mûres lors du stockage à 12 °C

Les travaux menés dans la présente thèse font progresser les capacités à piloter le pré- et le post-récolte pour valoriser au mieux le potentiel de qualité de mangues sous contrainte d'un débit journalier. Cependant, un opérateur de séchage qui voudrait utiliser pleinement cette voie devrait détourner vers une énergie utile voire nécessaire pour le bon fonctionnement de son unité de production. Avant la campagne de séchage, il pourra faire le possible avec ses fournisseurs, mais au moment de la campagne, il doit se concentrer sur son activité propre.

Disposer d'un stock tampon entre réception – maturation et parage – découpe – séchage permettrait de réduire fortement la tension induite sur l'ensemble de l'unité de transformation par les aléas d'approvisionnement.

Objectifs

L'objectif de ce travail est un test – validation de concept : pour une condition déjà pratiquée ponctuellement et sans évaluation des conséquences (12 °C), l'obtention de données quantitatives sur l'évolution de la qualité des mangues en fonction de la durée de conservation.

Les données produites doivent permettre de savoir si l'hypothèse d'un intérêt technique de cette opération de conservation est juste.

Résultats marquants

- La maturation commencée à 20°C se poursuit à 12°C, jusqu'à la maturité complète des mangues.
- La qualité des mangues stockées varie suffisamment peu pendant 11 jours pour qu'elles restent tout à fait adaptées pour une transformation des mangues par séchage.
- La limite de durée de conservation vient de la sénescence des fruits, mise en évidence par une baisse importante de leur fermeté et un fort ralentissement de la réduction de la masse.
- Les fruits deviennent difficiles à peler et découper avant que la couleur et les sucres de la pulpe ne se dégradent.

Evolution de la qualité de mangues mûres lors du stockage à 12 °C

Diop Alioune^{1,2,6,*}, Méot Jean-Michel^{3,6}, Léchaudel Mathieu^{4,6}, Dahdouh Layal^{3,6}, Labaky Paola^{3,6}, Delpech Charlotte³, Chillet Marc^{1,6}

¹ CIRAD, UMR QualiSud, 7, Chemin de l'IRAT, Saint-Pierre, La Réunion, France

² ITA, Route des Pères Maristes, BP-2765, Hann-Dakar - Sénégal.

³ CIRAD, UMR QualiSud, 34398 Montpellier, France

⁴ CIRAD, UMR QualiSud, 97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France

⁵ CIRAD, UMR PVBMT, 7 Chemin de l'IRAT, Saint-Pierre, La Réunion, France

⁶ QualiSud, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier SupAgro, Univ d'Avignon, Univ de La Réunion, Montpellier, France

I. Abstract

Cette étude a pour but tester les possibilités de conservation de fruits presque mûres afin de réduire la dépendance entre approvisionnement – stockage – maturation et consommation – transformation. Pour cela ont été suivis des critères de qualité physico-chimique et technologique de mangues au stade « *prêt à consommer* » mises en conservation à 12 °C. 35 mangues (cv Coghsall) ont été récoltées au stade point-jaune, lavées, puis mises en maturation à 20 °C. Au stade proche d'une maturité de consommation en bouche, les mangues ont été mises en conservation à 12 °C. Cinq mangues ont été analysées à la récolte, cinq au stade prêt à consommer puis tous les 3 à 4 jours pendant le stockage à 12 °C. Sur chaque mangue, la masse et la texture du fruit ont été mesurées ainsi que le Brix, l'acidité titrable, le pH et la couleur de la pulpe. Toutes les mangues ont atteint le stade « *prêt à consommer* » après cinq jours de maturation à 20 °C. La maturation a entraîné une diminution significative de l'angle de teinte H° de la pulpe, de l'acidité titrable et de la fermeté de la mangue. A l'inverse, le Brix et les pertes de masse ont augmenté de manière significative. La durée de conservation à 12 °C à partir de leur transfert à 12°C a été de 14 jours. Le Brix, le L* et le H° sont restés stables jusqu'à la fin de la conservation alors que l'acidité titrable et le pH ne se sont stabilisés qu'au 4^{ème} jour à 12 °C. La limite de fermeté (mesure non destructive) pour que les mangues soient facilement épluchables et tranchables a été atteinte après 11 jours de stockage à 12 °C. Cette étude montre qu'il est possible de stocker des mangues presque mûres de la variété Cogshall à 12 °C pendant 11 jours sans altération négative de leur qualité technologique pour le séchage.

II. Introduction

Disposer chaque jour d'une quantité de mangues de bonne qualité pour la vente au détail en frais ou pour la transformation est un défi étant donnée la difficulté de contrôler l'approvisionnement, le tri et la maturation des fruits. Par exemple, les unités de production de mangues sèches naturelles burkinabais étudiées par (Rivier et al., 2009), s'approvisionnent généralement deux fois par semaine. Les mangues mûres sont sélectionnées pour être directement séchées avant qu'elles ne se dégradent. Les mangues les moins mûres sont mises en maturation puis examinées – triées manuellement chaque jour pour en disposer une fois leur affinage terminée. Les deux difficultés de ce système sont (i) la contrainte de ne pas pouvoir garantir une qualité constante en entrée de séchage du fait de la subjectivité du tri et (ii) la nécessaire combinaison entre les approvisionnements de l'unité, les flux d'alimentation des séchoirs et la qualité.

Le stockage au froid entre 10 et 13 °C de mangues récoltées à un stade vert-mature permet aux opérateurs des filières d'exportation par cargo de conserver les fruits à un stade pré-climactérique durant toute la chaîne logistique du producteur jusqu'à l'importateur. En effet, l'abaissement de la température de stockage entraîne un ralentissement du métabolisme des fruits (Ambuko et al., 2018). Avant leur commercialisation, la maturation des fruits est généralement initiée en les exposant à température ambiante ou dirigée entre 20 et 23 °C pour la vente en frais (Sivakumar et al., 2011). La majorité des études sur les techniques post-récolte pour améliorer la conservation des mangues vert-matures se focalise sur des moyens alternatifs tels que les traitements à l'eau chaude (Self et al., 2012), en combinaison avec des techniques en atmosphère contrôlée (Kim et al., 2007), des agents de biocontrôle (Taïbi et al., 2020). Les résultats de ces recherches aident les filières export à fournir des fruits de qualité stable mais pour les opérateurs de séchage, il y a un manque de connaissances techniques sur la conservation des mangues de bonne qualité, ayant atteint un stade de maturité adapté pour le séchage et répondant aux besoins des opérateurs en fonction des débits de séchage par exemple.

La qualité des mangues est meilleure en pleine saison et l'abondance de la production entraîne une baisse des prix d'achat. La transformation des mangues en produits secs nécessite des fruits d'une fermeté idéale (ni trop mous, ni trop fermes) pour être facilement pelés et coupés en tranches, d'une couleur orange (teneur élevée en caroténoïdes) et d'un rapport sucre/acide élevé (Rivier et al., 2009). Disposer d'un moyen efficace de stocker les mangues mûres faciliterait

l'organisation de la production. En plus, elle pourrait permettre de prolonger la période de production de mangues séchées de bonne qualité à faible prix de revient.

La mangue étant un fruit climactérique, sa maturation de qui dépend de l'éthylène est décrite selon 4 phases respiratoires d'après Joas et al. (2009). D'abord une phase pré-climactérique avec un dégagement de CO₂ et d'éthylène faible, sans modifications biochimiques visibles sur les mangues vertes. La récolte des mangues pour l'exportation s'effectue à ce stade. Ensuite la phase de croissance climactérique avec seulement une augmentation de la production des gaz. D'après Nordey et al. (2016), le détachement du fruit sur l'arbre entraîne un stress provoquant l'augmentation de la production de ces gaz. Ce n'est qu'à la phase de crise climactérique avec un pic de respiration et de synthèse d'éthylène que les changements biochimiques sont amorcés. Il s'en suit la phase post-climactérique où les changements sont plus prononcés avec la conversion des amidons en sucres simples, la diminution de l'acidité, la synthèse des composés volatils et des caroténoïdes responsables de la couleur jaune orangée (Yahia, 2011). Les fruits subissent aussi des pertes en eau et une diminution de la fermeté liées à la respiration, à la diminution de la teneur en amidon et à l'altération de la structure et de la composition des parois cellulaires de la peau et de la pulpe (Schouten et al., 2018; Valente et al., 2004). Les fruits tendent ensuite vers la senescence. Le tri effectué par les opérateurs à la réception des mangues selon la maturité est ainsi très important car la vitesse de maturation dépend du stade de maturité du fruit (Joas et al., 2009). Dans cette étude, les mangues sont récoltées au stade de maturité point-jaune. A ce stade les fruits ont accumulé les métabolites nécessaires pour développer leur potentiel qualité et ont déjà débuté leur phase climactérique (Rosalie et al., 2018).

Cet article évalue le potentiel d'un stockage à 12 °C pour maintenir la qualité de mangues récoltées au stade point-jaune et ayant atteint une maturité post-récolte permettant leur séchage. Dans cette étude, l'évolution des paramètres physico-chimiques, comme la teneur en solides solubles, l'acidité titrable, la fermeté du fruit, les pertes de masse et la couleur, a été suivie lors d'un itinéraire en deux temps : d'abord, une maturation à 20 °C jusqu'à une maturité correcte pour le séchage puis une conservation à 12 °C jusqu'à ce que les fruits ne soient plus aptes à être transformés. Une analyse des corrélations entre les mesures non destructives et les critères physico-chimiques complète a aussi été proposée.

III. Matériels et méthodes

III.1 *Matériel végétal*

35 mangues (cv. Coghsall) ont été récoltées au stade point jaune, lavées et mise en maturation à 20°C / 90% d'humidité relative. Chaque jour, le stade de maturité a été évalué par un suivi visuel et tactile. Lorsqu'une mangue atteignait un stade de maturité correct pour la transformation par séchage, elle était transférée en enceinte de stockage à 12 °C. Tous les 3 à 4 jours, 5 à 6 mangues étaient prélevées pour le suivi de qualité. La fermeté du fruit entier était mesurée par test de compression non-destructif. La mesure des autres critères de qualité nécessitait la destruction des mangues. Le suivi de stockage a été arrêté suite aux premières mesures montrant que les mangues n'étaient plus aptes à être transformées.

III.2 *Analyse de la fermeté*

La fermeté des fruits a été évaluée par un test de compression sur le fruit entier à l'aide d'un analyseur de texture (TA-XT2, Stable micro Systems, London, UK, cellule de charge de 5 kg). Le test a été réalisé en trois points sur l'épiderme de chaque face du fruit en effectuant une mesure proche de l'apex, une mesure au milieu de la joue et une mesure proche du pédoncule à l'aide d'une sonde sphérique (2 cm), avec une vitesse de sonde de 1 mm.s⁻¹ et d'une force maximale de 10 N. La distance parcourue par la sonde lors d'une compression à 5 N a été utilisée comme indicateur de la fermeté des mangues (Figure 17 ; Labaky et al. (2020)).

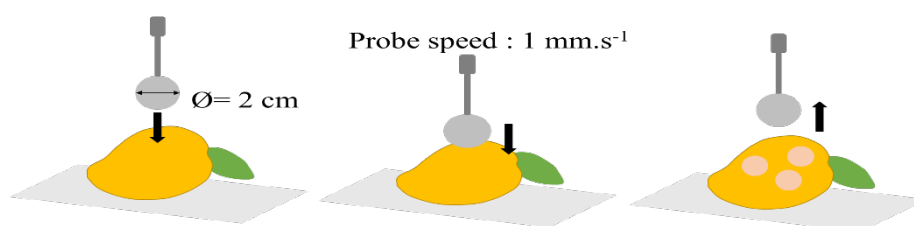


Figure 17 : Test de compression issu de Labaky et al. (2020)

III.3 *Mesures physico-chimiques et colorimétriques*

Après chaque série de mesures non destructives, les mangues ont été pesées, puis épluchées et tranchées avec une mandoline en inox à une épaisseur de 4 mm. Sur chaque joue de chaque mangue, 2 tranches ont été récupérées en partant du noyau vers la périphérie sans prélever la tranche la plus proche du noyau (plus colorée que les tranches périphériques). 4 mesures de couleur ont été effectuées sur chaque mangue avec une prise de mesure (moyennes de 5 flashes) au centre de chaque tranche avec un chromamètre (Minolta CR-410, Tokyo, Japan). Les autres analyses ont été effectuées individuellement sur la pulpe broyée. L'indice réfractométrique

(°Brix) de la pulpe broyée a été mesuré avec un réfractomètre portable (PAL- α , Atago, Tokyo, Japan). Le pH et l'acidité titrable ont été obtenus par titration de 1 g de pulpe broyée à l'aide d'un titrateur automatique (TitroLine, Schott Instruments, Mainz, Germany) avec une solution de soude a 0,05 N.

III.4 *Analyses statistiques*

Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel RStudio (R Core Team, 2019). Des analyses de variance ont été effectuées pour tester les effets de la durée de conservation sur les paramètres physico-chimiques, colorimétriques et de fermeté. Des groupes homogènes ont pu être créés pour faire ressortir la stabilité des paramètres. Les moyennes de 5 à 6 réplicats ont été comparées par un test de Tukey.

IV. Résultats

IV.1 *Evolution des paramètres physico-chimiques lors du stockage à 20 °C*

La figure 2 représente l'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques, colorimétriques et texturaux de mangues cv. Cogshall récoltées au stade point-jaune, lors d'une maturation à 20 °C pendant 5 jours suivi d'un stockage à 12 °C pendant 14 jours. A la figure 18E, la fermeté des mangues est décrite par la distance parcourue par la sonde sphérique jusqu'à une pression limite proche de celle exercée par des opérateurs de tri. Plus la distance est faible, plus les mangues sont résistantes à la compression donc fermes (Labaky et al., 2020).

Au bout de 5 jours de stockage à 20 °C, le Brix, le pH et les pertes de masse ont augmenté de manière significative ($p < 0,05$), tandis que le L^* , le H° , l'acidité titrable et la fermeté ont baissé de manière significative ($p < 0,05$). Ces évolutions des paramètres physico-chimiques sont celles de fruits en maturation ; le potentiel organoleptique se développe (Yahia, 2011). Lors de la maturation, la dégradation des amidons en sucres simples entrainerait l'augmentation du Brix selon (Hossain et al., 2014) et par conséquent de la saveur sucrée perçue par les consommateurs. La couleur jaune orangé de la pulpe obtenue en fin de maturation serait due à l'augmentation de la teneur en caroténoïdes, négativement corrélée avec l'angle de teinte H° (Rosalie et al., 2019). Les fruits subissent aussi des pertes en eau et une diminution de la fermeté liées à la respiration, à la diminution de la teneur en amidon et à l'altération de la structure et de la composition des parois cellulaires de la peau et de la pulpe (Schouten et al., 2018; Valente et al., 2004). Les valeurs de fermeté obtenues sur les mangues mûres sont très proches de celles

trouvées par (Labaky et al., 2020) lors du suivi de maturation de mangues selon le même test de compression.

La température de 20 °C est très largement utilisée pour la maturation des variétés commerciales telle que Tommy Atkins, Keitt, Cogshall et Kent (Joas et al., 2012; Sivakumar et al., 2011). Dans notre étude, les valeurs de Brix, de pH, d'acidité titrable et des indices colorimétriques obtenues sont aussi très proches de celles obtenues dans les travaux de Diop et al. (2021) avec des mangues de la variété Cogshall, récoltées au stade point-jaune et muries jusqu'à la maturité de bouche à 20 °C.

La durée courte de maturation est liée au stade relativement avancé de maturité à la récolte des fruits utilisés lors de cette expérience. Les mangues ont été récoltées au stade point-jaune qui correspond à celui où les fruits ont accumulé tous les métabolites nécessaires à la maturation. Le raccourcissement de la durée de maturation par rapport à celle des mangues vertes est dû à l'inexistence de la phase préclimactérique pour les mangues de stade point-jaune. La crise climactérique a déjà débuté sur l'arbre avant la récolte (Joas et al., 2013). Ce stade est intéressant car il peut permettre aux opérateurs de transformation de disposer rapidement de mangues mûres de bonne qualité, contrairement aux mangues récoltées au stade vert-mature dont la durée de maturation est d'environ 12 jours en moyenne et elle peut dépasser 20 jours (Hatton and Campbell, 1965; Joas et al., 2012; Rosalie et al., 2018). C'est aussi le stade de récolte pour la vente en frais à l'Île de la Réunion pour que les consommateurs disposent rapidement de mangues prêtes à être consommées ou aux unités de transformation. De plus, les mangues séchées issues de mangues récoltées au stade point-jaune sont de meilleure qualité que celles récoltées au stade vert-mature avec une couleur plus orangée, un Brix plus élevé et une acidité plus faible (Diop et al., 2021).

IV.2 *Effets du stockage à 12 °C sur la qualité des mangues mûres*

Un ralentissement de toutes les évolutions des paramètres physico-chimiques, colorimétriques et texturaux a été constaté lorsque les fruits ont été transféré à 12 °C (Figure 18). Les valeurs de Brix et des indices colorimétriques (L^* et H°) se sont nettement stabilisées, jusqu'à la fin du stockage à 12 °C, 14 jours plus tard. Les températures de stockage faibles ralentissent simultanément plusieurs voies biochimiques selon Ambuko et al. (2018). D'après Hossain et al. (2014), l'arrêt de l'évolution de la teneur en sucres lors du stockage au froid est associé à la réduction significative de l'activité de l'amylase et l'hydrolyse de l'amidon. Il en est de même pour la synthèse des caroténoïdes qui a été ralentie par le stockage à 12 °C de mangues de la

variété Cogshall (Rosalie et al., 2018). Le maintien des valeurs de Brix, de L^* et H° a aussi été constatée lors des 2 premières semaines de stockage à 12 °C de papayes (Ali et al., 2011). La stabilisation du Brix et du H° qui donnent respectivement le goût sucré et la couleur orangée est d'autant plus importante que ceux sont les deux premiers critères d'achat des mangues sèches selon Arnoldus et al. (2009).

Contrairement au Brix, la diminution de l'acidité titrable s'est significativement ($p < 0,05$) poursuivie, à une vitesse plus lente, jusqu'au 4^{ième} jour de stockage à 12 °C avant de se stabiliser jusqu'à la fin, au 14^{ième} jour (Figure 18B). Les dynamiques d'augmentation du pH sont inverses à celles de l'acidité titrable (Figure 18B). Le rapport sucre / acide plus élevé après 4 jours de stockage à 12 °C par rapport à la fin de la maturation à 20 °C pourrait rendre le goût des fruits plus doux et plus attractif (Malundo et al., 2001). A la fin de la maturation à 20 °C, la dégradation des acides, consommés dans les voies métaboliques, n'était pas achevée. Même si une température de 12 °C est faible, la dégradation des acides due à leur implication dans diverses voies métaboliques a été constatée lors de stockages de fruits à des températures plus faibles (Róth et al., 2007). C'est plus le retard de l'activation des réactions mobilisant les acides par rapport à celles mobilisant l'amidon (Pandit et al., 2009) que font ressortir nos données. Le ralentissement de la dégradation après introduction à 12 °C serait dû à la sensibilité du métabolisme de l'acide citrique et malique à la température (Famiani et al., 2015).

A 12°C, Les pertes de masse se sont poursuivies de manière significative ($p < 0.05$) mais plus lente puisque les mangues n'ont perdu que 2,4 % de leur masse après 7 jours de stockage à cette température (contrairement à une perte de 4,4 % pendant 5 jours de stockage à 20 °C). Au 11^{ième} jour, les fruits ont perdu environ 5,8 % de masse en plus par rapport à l'entrée à 12 °C avant de se stabiliser au 14^{ième} jour. Les mêmes dynamiques ont été obtenues par (Ambuko et al., 2018) montrant que les pertes de masse étaient significativement plus élevées à 20 °C comparées à celles à 12 °C. Même si les pertes de masse fraîche sont plus lentes lors du stockage au froid, des valeurs seuil pourraient être atteintes sur des longues durées de conservation et aboutir à la dégradation des tissus (Bower et al., 2002).

La fermeté des mangues n'est pas maintenue lors de la conservation au froid des mangues (Amwoka et al., 2021). A 12 °C, la fermeté s'est stabilisée pendant les 4 premiers jours de stockage. Ensuite elle a légèrement baissé jusqu'au 11^{ième} jour ($p < 0,05$; $+0,04\text{mm/j}$). En effet, les activités des enzymes (cellulase, polygalacturonase, beta-galactosidase) majoritairement responsables de la lyse des parois cellulaires par dégradation des pectines, cellulose, et

hemicellulose, sont toutes fortement diminuées aux faibles températures (Baswal et al., 2020; Devanesan et al., 2011; Ketsa et al., 1999). Ensuite, la fermeté a baissé fortement (+ 0,2 mm/j) et de manière significative ($p < 0,05$) au 14^{ème} jour de stockage à 12 °C. La sonde a parcouru une distance de 1,2 mm de plus sur les mangues par rapport à celles en entrée en stockage à 12 °C. Cette distance est quasiment équivalente à l'augmentation de la distance parcourue par la sonde pour les mangues en fin de stockage à 20 °C par rapport aux mangues à la récolte (1,4 mm) (jour 5). Ceci fait ressortir une très grande perte de fermeté à la fin du stockage à 12 °C, correspondant au passage de mangues matures à des mangues en sur-maturité. C'est d'ailleurs au 14^{ème} jour de stockage à 12 °C que l'expérience a dû être arrêtée du fait de la difficulté à peler et à trancher les mangues. Le lien entre la fermeté et la difficulté de pelage et de tranchage a été établi par (Dea et al., 2013), lors d'une étude évaluant la fermeté idéale pour la transformation de mangues fraîches en produit 4^{ème} gamme.

IV.3 *Corrélation entre les paramètres physico-chimiques et la fermeté*

La figure 19 représente les corrélations entre les paramètres physicochimiques, colorimétriques et de fermeté, mesurés sur les mangues conservées à 20 °C puis à 12 °C. Tous les paramètres physico-chimiques sont significativement corrélés à la fermeté des mangues lors du stockage ($p < 0,05$) (Figure 19). Le pH et l'acidité titrable sont les mesures destructives qui ont les meilleurs coefficients de corrélation avec la fermeté (respectivement -0,90 et 0,92). Une très bonne corrélation a aussi été obtenue entre les pertes de masse et la fermeté ($R^2 = 0,88$, $p < 0,05$). Les paramètres qui se sont entièrement stabilisés lors du stockage à 12 °C comme la couleur et le Brix ont une moins bonne corrélation avec la texture, qui a continué de diminuer. Cependant, la légère augmentation de l'acidité et des pertes de masses ainsi que l'augmentation légère du pH lors de la conservation font que leurs corrélations avec la texture sont meilleures. Selon Byrne et al. (1991), la corrélation entre la baisse de la fermeté et celle de l'acidité titrable correspond à la corrélation entre la baisse de la fermeté avec celle de la teneur en acide citrique. Rathore et al. (2007) ont montré que les pertes de masse augmentaient en même temps que la baisse de la fermeté quelles que soient leurs dynamiques de baisse en fonction de la température de conservation. Dans cette étude, lorsque la fermeté de la mangue empêchait un bon épluchage des mangues pour la transformation, les pertes en eau étaient au-dessus de 8 %. Comme l'a montré Patil et al. (2016), le flétrissement des mangues qui est un défaut qualitatif majeur, est fortement lié à la perte en eau des fruits. Dans le cas de notre étude, les pertes de masse sont de bons indicateurs de l'état de fermeté des mangues mais la sénescence a probablement contribué à la réduction de la processabilité pour la transformation en mangues sèches. Pour des

conditions de stockage différentes, il sera prudent de vérifier et éventuellement ajuster la limite de fermeté.

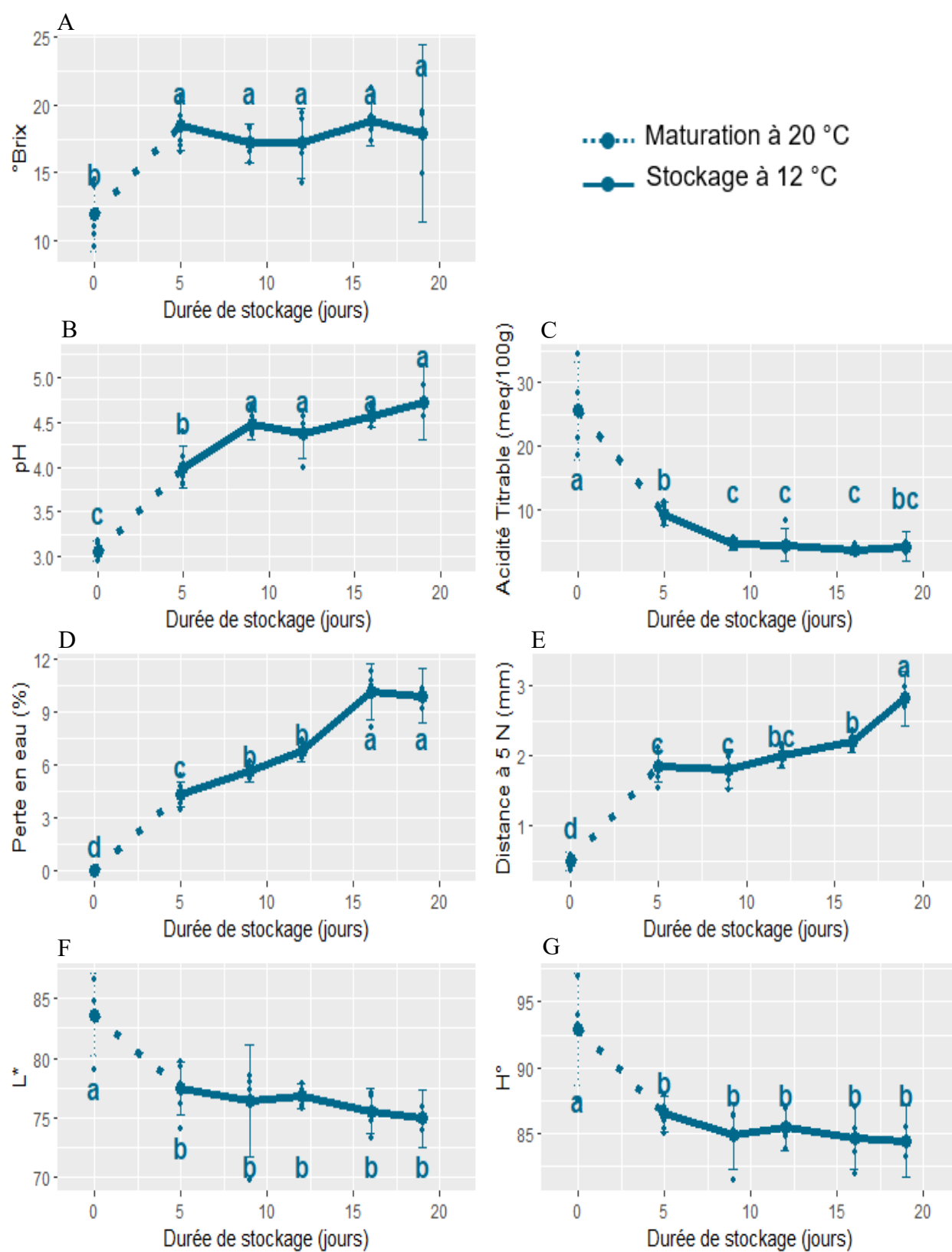


Figure 18 : Evolution des paramètres physico-chimiques et colorimétriques lors de la conservation à 20 °C suivie de la conservation à 12 °C

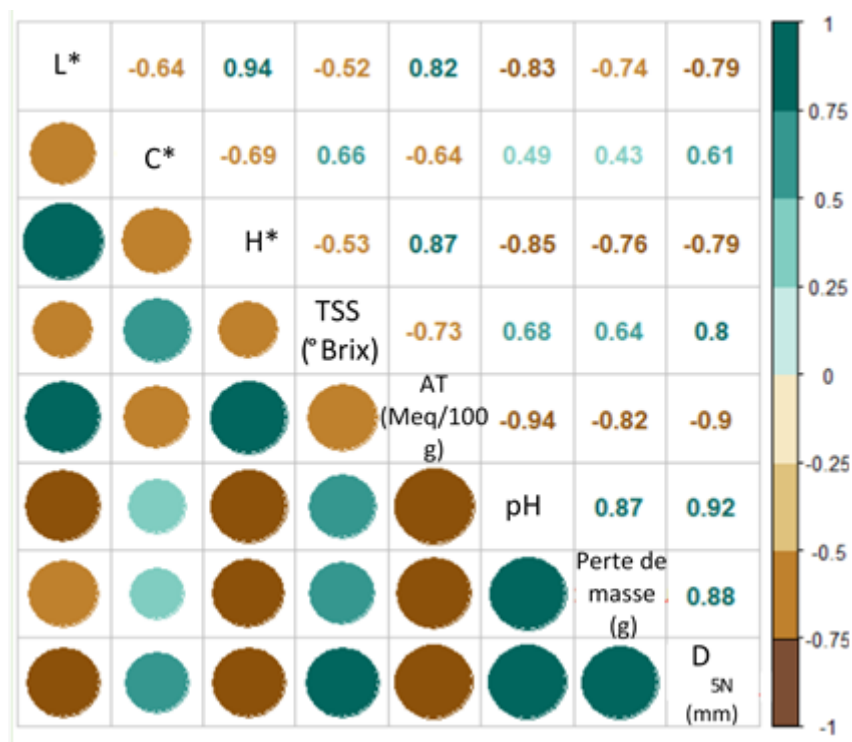


Figure 19 : Corrélation linéaire entre paramètres qualité mesurés sur la pulpe de mangues fraîches muries à 20 °C et conservées à 12 °C

V. Conclusions et perspectives

Cette étude montre qu'il est possible de stocker des mangues presque mûres de la variété Coghsall à 12 °C pendant 11 jours sans altération gênante de leur qualité. Les mesures de l'évolution de la fermeté et de la masse des mangues ont permis de fixer des limites discriminantes de perte de qualité technologique et physico-chimique pour le procédé de séchage. Les mangues de très faible fermeté, inadaptées au processus de séchage, pourraient être transformées en purée car, au-delà des paramètres de texture, tous les paramètres physico-chimiques sont restés stables.

L'intérêt technico-économique d'une conservation des produits prêts à être transformés reste à conduire. Pour cela, notre test de concept technique serait utilement complété à d'autres températures de stockage. Plus les températures de conservation se rapprocheront des températures ambiantes, moins élevés seront les investissements et coûts de fonctionnement. Cependant, les apports dans le fonctionnement des unités de séchage seront aussi réduits.

Discussion générale

Discussion générale

Pour obtenir des mangues séchées naturelles de qualité, l'approche d'intégration des compétences de tous les acteurs de la recherche sur la filière mangue est primordiale mais très complexe à mettre en œuvre. Chaque partie prenante de la filière a une attention plus particulière à certains des critères de qualité. Dans la filière mangues, en agronomie, les travaux de Léchaudel, (2004) et de Nordey, (2014) avaient posé les bases de la compréhension des relations entre les apports hydriques et carbonés et l'accumulation en carbohydrates. Celle-ci a un rôle essentiel dans le développement du fruit et son aptitude à avoir une teneur en sucres élevée. Dans le projet *Interfaces*, en parallèle de la présente thèse, a été réalisée une autre thèse dont l'objectif était la modélisation de l'élaboration de la qualité des mangues sur l'arbre et après récolte, et plus particulièrement orientée sur les différents sucres de la pulpe. Une démarche expérimentale conséquente a été réalisée. Des modèles agro-écophysologiques ont été complétés, adaptés, couplés puis améliorés. Ils permettent de prévoir l'évolution des concentrations en amidon et en différents sucres lors de la culture et du process de stockage – maturation des mangues cargo. Les avancées sont importantes, pour l'agronomie. Elles apportent des éléments sur un critère de qualité ce qui est juste pour l'aval de la filière. En effet, celle-ci ne s'intéresse qu'aux mangues ayant des teneurs en sucres ou des potentiels de teneurs en sucres élevées. Une bonne mangue est alors une mangue qui, en plus d'une teneur en sucres élevée, a une belle couleur et un arôme agréable. D'autres *Interfaces* n'ont pas pu être étudiées telles que celle entre la qualité des mangues fraîches et la texture des mangues sèches ou encore, plus en aval celle entre la qualité des mangues sèches et les préférences des consommateurs.

Une autre difficulté des approches intégratives se situe au niveau expérimental. Lors de la préparation du projet puis en début de thèse, la difficulté voire l'impossibilité de constituer des lots homogènes a été sous-estimée malgré un dialogue entre chercheurs en agronomie et les chercheurs en génie des procédés riche et sincère. Les lots de mangues à la récolte ont été très hétérogènes, à notre sens et pour nos objectifs. Par ailleurs, la réalisation de nombreuses conditions de stockage au cours de la maturation nous a fait choisir des tailles d'échantillons faibles comparativement à celles utilisées par les agronomes. Une incertitude importante a alors entaché les dynamiques d'évolution des paramètres de qualité pendant la maturation et le séchage, alors qu'en préparation des essais, des efforts importants ont été mobilisés pour que le séchoir soit à même d'appliquer des conditions homogènes pour tous les échantillons (Annexe 1). Comme expliqué dans le chapitre 1 de la partie 2, des mangues récoltées selon le même critère de maturité à la récolte puis ayant suivi un itinéraire post-récolte identique ont eu des

caractéristiques de la qualité très dispersées. Cela a contribué à l'abandon de la démarche de modélisation des cinétiques d'évolution des paramètres qualité lors de la maturation. Pour la variété Cogshall, la fluorescence de la chlorophylle avait donné de bons résultats pour la prédiction de la maturité à la récolte comparativement à la méthode de comptage du nombre de degrés jour. Cette dernière technique qui a largement été utilisée dans la recherche est peu pratique pour les filières de transformation. En plus de la difficulté à repérer la date de floraison alors qu'il y en a plusieurs sur un même arbre, les conditions environnementales de croissance (température, humidité, rayonnement...) varient en fonction de la position de l'arbre dans le verger, du fruit dans l'arbre, de l'exposition au soleil...(Léchaudel and Joas, 2007). Léchaudel et al. (2010) ont démontré l'amélioration de la prévision de la maturité des fruits par la mesure de la fluorescence de la chlorophylle et sans tenir compte des conditions environnementales de croissance des fruits. Cette technique que nous avons utilisée nous a permis de faire une discrimination des maturités très différentes, par exemple entre vert-mature et point-jaune. Nos récoltes étaient basées sur la mesure de la fluorescence maximale de la chlorophylle (F_m) sur la peau du fruit encore sur l'arbre, puis vérifiée en laboratoire sur le fruit récolté. Les mangues dont la F_m était comprise entre 1050 et 1175 étaient considérées comme de stade vert-mature et celles avec une fluorescence en dessous de 950 étaient considérées comme de stade point-jaune (Léchaudel et al., 2010). Les analyses physico-chimiques (Partie II. ; Chapitre I) ont montré que ce tri était efficace, car les mangues point-jaune étaient à un stade de maturité plus avancé. Mais le constat est qu'au sein des lots des différents stades, demeurerait une très grande variabilité. Des intervalles de F_m moins larges aurait peut-être réduit cette variabilité mais au prix d'un effort expérimental bien difficile à assumer. Peut-être que la détection de variation de F_m serait un meilleur indicateur car la concentration en chlorophylle est probablement différentes entre deux fruits à même maturité physiologique. Un suivi de l'évolution de la fluorescence mangue par mangue, sur l'arbre, pourrait fournir une indication du début de la phase vert – mature. Cette méthode n'apporterait cependant pas de bonne réponse aux besoins d'expérimentation comme les nôtres car elle serait très lourde à mettre en œuvre. Elle serait d'autant plus lourde que la tolérance d'hétérogénéité des lots serait faible, alors qu'ils devraient être constitués en un même jour. A la variabilité inter-fruit, s'ajoute l'hétérogénéité de composition au sein d'un même fruit. Elle a été bien mise en évidence par les travaux de Nordey et al. (2014). Ils ont montré des variations importantes de maturité corrélées avec les variations spatiales des caractéristiques de qualité des mangues mesurées. Nos travaux ont rencontré les mêmes difficultés sur les mesures de la couleur des mangues. En effet, une tranche de mangue, dans chacun de ses axes, comprend des parties périphériques, des parties plus internes et

proches du noyau, puis à nouveau des parties périphériques. A cela s'ajoute les dissymétries du fruit dont la plus nette dans le grand axe : apex – pédoncule. Sur une tranche de mangue, la couleur mesurée près de la périphérie était différente de celle mesurée vers le centre (cf. Partie I ; Chapitre I). En plus du suivi individuel des fruits et tranches, un repérage des lieux de mesure était nécessaire. Pour contourner cette difficulté, Korbel et al. (2013) ont effectué leurs recherches sur un produit modèle : de la poudre de pulpe de mangue lyophilisée. Ce produit modèle est très homogène ce qui permet de réaliser un grand nombre d'essais cohérents entre eux. Cependant, il ne respecte ni l'intégrité des cellules, ni celle des structures tissulaires qui influencent les transports d'eau. Un tel milieu modèle est utile pour étudier voire modéliser la sensibilité des phénomènes des brunissements enzymatiques et non-enzymatiques à différents paramètres. Des essais sur produit réel seront cependant toujours nécessaires pour identifier les paramètres dépendant de la structure du produit, que ce soit à l'échelle de la cellule ou du fruit. Dans le cadre de cette thèse basée sur l'hypothèse que la variabilité en composition est la source de différences de qualité organoleptiques sur les produits consommés, la première approche a été de créer une variabilité de composition par les paramètres pré-récolte et post-récolte et d'étudier leur impact sur les modifications de qualité lors d'un séchage standard (60 °C / 30 % / 5 h).

Nos travaux se sont majoritairement concentrés sur la couleur qui est la principale problématique qualitative des mangues sèches naturelles et le premier critère d'achat des consommateurs. Toutefois, les vérifications sur d'autres critères de qualité ont été faites. Par exemple, l'acidité titrable, exprimée sur une base sèche, n'est pas modifiée par le séchage quelle que soit la maturité du fruit (Figure 20).

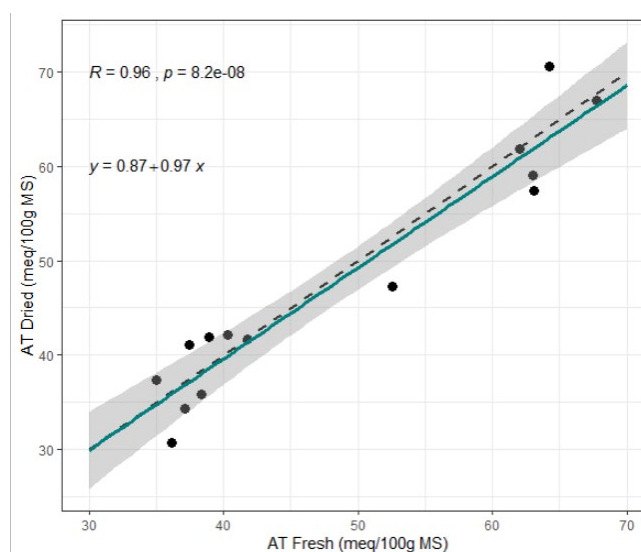


Figure 20 : Acidités titrables, exprimées sur base sèche, mesurées sur des pulpes de mangues sèches en fonction de celles mesurées sur les mêmes pulpes avant séchage

I. Les conditions de pré- et post-récolte n'ont pas d'influence sur les modifications de couleur des mangues lors d'un « bon » séchage

Un séchoir pilote a été développé et installé pour le projet (Annexe 1). Une caractéristique essentielle du cahier des charges était de permettre un séchage simultané et similaire de plusieurs échantillons. Cela a été vérifié par des essais de séchage de pièces de tissus absorbant (découpes de Carréponge de Spontex) saturés en eau. L'effet de la maturité des mangues *Cogshall* sur la cinétique de séchage a alors été testé. Il en résulte que le séchage de mangues très immatures est légèrement plus rapide que celui des autres mangues mais qu'au bout de 5h, les mangues des différentes maturités ont sensiblement une même humidité résiduelle (Figure 21). Il a été alors possible d'affecter les modifications de qualité aux paramètres pré-post-récolte, seuls facteurs différents entre les échantillons. Une grande variabilité a été créée par les combinaisons de facteurs. Lors de la maturation, tous les facteurs pré-post-récolte ont eu un impact significatif sur les paramètres physico-chimiques et colorimétriques étudiés (Partie 2, Chapitre 2). Toutefois, au sein des mêmes lots ayant suivi le même itinéraire, une dispersion importante des caractéristiques physico-chimiques et colorimétriques a été constatée. La dispersion pour les échantillons constitués en utilisant la fluorimétrie comme indicateur de maturité (*Cogshall*, Réunion) a été sensiblement plus importante que celle des échantillons constitués sur la base de l'estimation de la maturité par des cueilleurs experts (*Kent*, Sénégal).

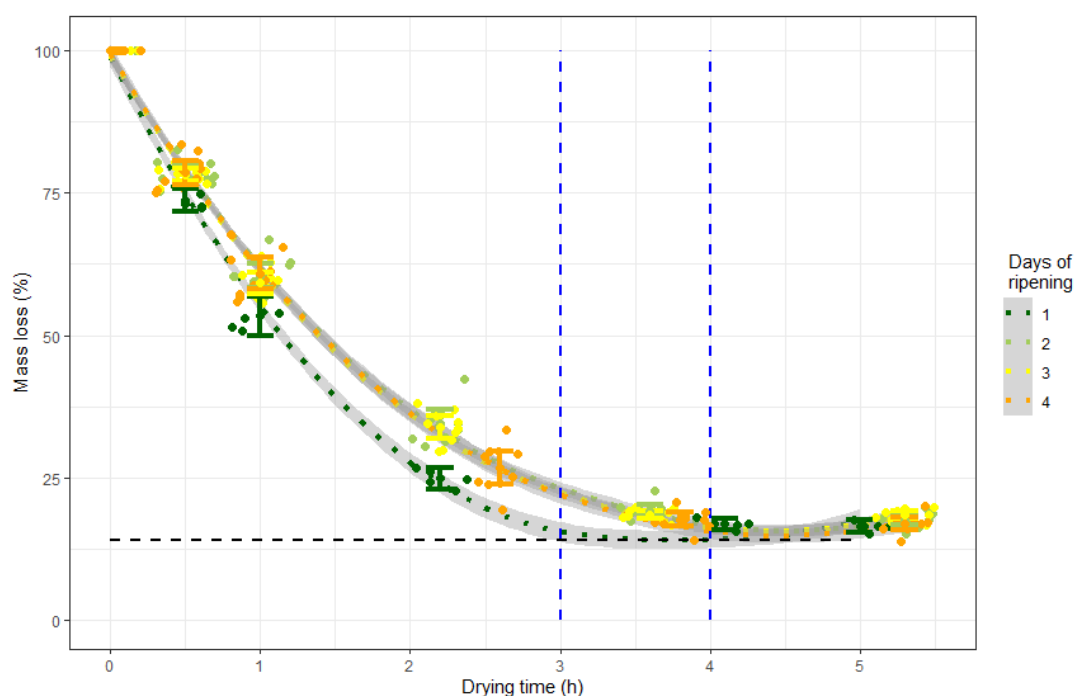


Figure 21 : Cinétiques de perte en eau des tranches de pulpe de mangues fraîches lors du séchage en fonction du stade de maturité

I.1 *Peu de modification de la couleur des mangues fraîches par nos conditions de séchage*

Malgré la variabilité de composition induite par l'itinéraire avant séchage en termes de substances impliquées dans les réactions de brunissement, ces paramètres pré-post-récolte n'ont eu que des impacts très mineurs sur les modifications de couleur au cours du séchage à 60 °C, 30 % HR et 1 m/s pendant 5 h. Les régressions linéaires entre les paramètres de couleurs (notamment le L^* très lié aux phénomènes de brunissements (Maskan, 2001)) avant et après séchage, ont montré la proximité de la droite de régression et des points expérimentaux à la première bissectrice, montrant que la couleur avant séchage est quasiment la même que celle après séchage. Pourtant, Corzo and Álvarez (2014) ont trouvé des changements de couleur significatifs surtout pour les séchages à des températures supérieures ou égales à 60 °C avec un brunissement plus intense pour les mangues à maturité avancée par rapport aux mangues mi-mûres ou immatures. Dans l'étude de Corzo and Álvarez (2014), 3 paramètres peuvent permettre de comprendre les différences entre leurs résultats et les nôtres : l'hygrométrie, la vitesse d'air et la géométrie des tranches. L'utilisation de paramètres de séchage 60 °C / 5-10 %HR, 1.71-1.91 m s⁻¹ et 3 cm d'épaisseur de tranche de pulpe (contre 30 % HR, 1 m s⁻¹ et 4 cm) a conduit à un début de séchage plus rapide puis un maintien du produit à a_w intermédiaire et température plus élevée. Nous détaillons cela dans le paragraphe suivant.

I.2 *Effet combiné de la vitesse de séchage et des réactions de brunissement :*

En début de séchage, l'évaporation superficielle de l'eau libre se fait à vitesse constante (phase 1 ; Bonazzi and Bimbenet. (2003)). La température du produit est égale à la température humide de l'air. Le chaleur transmise à la surface du produit est totalement consommée par la vaporisation de l'eau (Bonazzi and Bimbenet, 2003). Cette égalité peut être écrite comme suit.

$$\dot{Q} = h S (T_{air} - T_h) = \dot{m}_{eau} \cdot \Delta H_v \quad (Eq. 8)$$

$\dot{Q}$ (W) correspond à la puissance échangée entre l'air et la tranche de mangue. Sa première expression est celle de l'apport de chaleur au travers de la couche limite se situant à l'interface air / produit. h (W.m⁻².K⁻¹) est le coefficient d'échange thermique au sein de cette couche, S (m²) est la surface d'échange, T_{air} et T_h (K) sont respectivement la température de l'air et la température humide. La seconde expression est celle de la puissance portée par la vapeur d'eau qui est enlevée au produit par l'air. ; $\dot{m}_{eau}$ (kg s⁻¹) est le débit évaporatoire et ΔH_v la chaleur latente de vaporisation (J kg⁻¹).

Des transferts d'eau de l'intérieur vers l'extérieur du produit ne sont pas limitants. Ils permettent d'alimenter la surface puis l'eau est entraînée par l'air. La combinaison des deux permet de faire ressortir les paramètres régissant la vitesse de séchage durant cette phase :

$$\dot{m}_{\text{eau}} = S \frac{h}{\Delta H_v} (T_{\text{air}} - T_h) \quad (\text{Eq. 9})$$

Dans les travaux de Corzo and Álvarez (2014), le débit évaporatoire $\dot{m}_{\text{eau}}$ est plus élevé que celui de notre étude. Les différences de température sont respectivement de 31 °C et 20 °C. A cela s'ajoute leur coefficient d'échange de chaleur h entre 1,5 et 1,7 fois plus élevé selon la relation 12 (Rivier et al., 2009). Ceci est dû à leurs vitesses d'air de séchage comprises entre 1.71 et 1.91 m.s⁻¹ par rapport à celle appliquée pour nos travaux (1 m.s⁻¹). A cela s'ajoute encore un rapport S/V plus élevé pour des tranches de plus faible épaisseur (3 mm vs 4 mm). Au final, la phase 1 des séchages de pièces de mangues de Corzo and Álvarez, (2014) doit être sensiblement plus courte que celle de nos séchages. La baisse de la teneur en eau des mangues était plus rapide lors de cette phase.

$$h = K \times V^{0,8} \quad (\text{Eq. 10})$$

Avec K : constante, V : la vitesse de l'air.

Durant la phase de séchage à vitesse constante, pour les conditions que nous avons mises en œuvre et celles des études précitées, le développement du brunissement enzymatique est négligeable à cause de la baisse rapide de l' a_w de surface (Korbel et al., 2013). Ce développement peut être plus intense et avoir des impacts significatifs lorsque la vitesse de séchage initiale est trop faible. C'est souvent le cas pour un séchage solaire à convection naturelle comme le constatent Kanyinda (2017) et Mugodo and Workneh (2021). Il en est de même pour des séchoirs à convection forcée s'ils sont trop chargés en produits par rapport à la capacité de chauffe et le renouvellement de l'air (Pott et al., 2005). L' a_w de surface des produits séchés reste plus longtemps, parfois trop longtemps, dans des plages favorables au développement des réactions de brunissement enzymatique.

Notons aussi que le développement de la réaction de Maillard à cette première phase de séchage est très faible et ne représente qu'une infime partie des réactions de coloration à cause de l'activité de l'eau élevée et la faible température de surface des produits. Korbel et al. (2013a) ont montré que des indices de développement de la réaction de Maillard tels que la disparition des acides aminés, des sucres réducteurs, ainsi que l'apparition de composés intermédiaires de cette réaction étaient négligeables en début de traitement thermique.

Lors de la phase de séchage à vitesse décroissante (phase 2), les mécanismes de transferts diffusifs de l'eau du centre du produit vers la périphérie sont limitants. La température du

produit est très proche de celle de l'air de séchage, les relations précédentes (Eqs. 8 et 9) sur les mécanismes de transfert ne sont plus valables (Bonazzi and Bimbenet, 2003). L'abaissement de la teneur en eau moyenne lors de cette phase est plus rapide lorsque la longueur caractéristique de transfert est plus faible. C'est le cas de la géométrie utilisée dans les travaux de (Corzo and Álvarez, 2014; Fratianni et al., 2020; Russo et al., 2019) comparativement aux dimensions utilisées pour nos travaux (3 mm contre 4 mm). Defraeye, (2017) a confirmé la diminution significative de la durée de séchage avec la diminution de l'épaisseur des tranches de mangues, montrant ainsi qu'un éventuel « croûtage » n'a pas d'influence prépondérante.

Au bilan, les conditions de séchage expérimentées dans les travaux Corzo and Álvarez. (2014); Fratianni et al. (2020); Izli et al. (2017) et Russo et al. (2019) leur ont permis d'obtenir des vitesses de séchage plus élevées et par conséquent une a_w plus faible à l'équilibre surtout à cause d'une humidité relative plus faible et une ventilation plus forte. L'association entre les a_w rapidement faibles et les températures élevées de la phase 2 plus longue a pu entraîner un développement de la réaction de Maillard en fin de séchage et ainsi des variations plus importantes des indices de couleur. En modèle milieu reconstitué, Korbel et al. (2013a) ont aussi montré que la disparition des sucres réducteurs, des acides aminés et l'apparition des composés intermédiaires de la réaction de Maillard étaient plus prononcées à la fin du traitement thermique des mangues à une a_w de 0,6.

Le diagramme de séchage standard (60°C / 30 % HR / 1 m.s⁻¹ / 5h) utilisé lors de cette thèse conduit à des effets faibles du pré-récolte et du post-récolte autres que ceux directs sur la qualité de la matière fraîche. Il n'en est pas de même pour les deux autres séchages comme développé dans le paragraphe suivant.

II. La variabilité induite par la maturité influence le comportement des mangues lors d'un séchage non optimal

Contrairement au diagramme de séchage standard utilisé pour étudier l'effet du pré-récolte et du post-récolte sur les modifications de qualité lors du séchage, le degré de maturité et les paramètres de l'air de séchage ont influencé de manière significative le comportement de la couleur des mangues lors de séchages moins optimaux. Le type de brunissement et son intensité ont été influencés par le type de séchage et la maturité du fruit. D'une part le brunissement enzymatique prépondérant pour le séchage « humide » (début à 60 °C / 60 % HR) et d'autre part le brunissement non-enzymatique survenu lors du séchage « chaud » (fin à 80 °C / 30 % HR). Le séchage standard à 60 °C / 30 % HR a été utilisé comme référence.

- **Le séchage « humide »**

D'un point de vue thermique, le diagramme de séchage humide (60 °C / 60 % HR) n'a pas une bonne performance de déshydratation. Avec une température de surface des tranches de mangues à 50,4 °C, la différence de température entre l'air et la surface des tranches est faible ($\Delta T = 9,6^{\circ}\text{C}$). La vitesse de séchage en phase 1 est alors deux fois plus faible que pour les séchages standard et chaud ($\Delta T = 20,3^{\circ}\text{C}$). De plus, la phase 1 se prolonge jusqu'à une teneur en eau moyenne plus basse : le flux d'eau limite pour le bon approvisionnement de la surface est deux fois plus faible et la diffusion de l'eau est facilitée par la température du produit plus haute (Dissa et al., 2008).

L'effet sur le brunissement n'est pas évident. D'un côté, les réactions sont plus rapides mais de l'autre, un abaissement de l'activité enzymatique est constaté. A 50 °C (température de surface des tranches de mangues) l'activité des PPO des mangues baisse d'environ 20% (Wang et al., 2007) ; l'activité enzymatique des PPO est plus importante aux a_w proches de 1 (Korbel et al., 2013c). L'ensemble est en concordance avec les travaux de Pott et al. (2005) qui émet l'hypothèse que le séchage à des températures modérées (environ 60 °C) et à des activités d'eau élevées entrainerait la formation de quinones à cause des activités des polyphénols oxydases élevées.

Cela est cohérent avec le résultat d'un brunissement statistiquement lié positivement et de manière linéaire avec la maturité des fruits. Ce résultat est en adéquation avec les travaux de Corzo and Álvarez (2014). L'origine de ces différences pourrait venir du fait que la teneur en polyphénols et l'activité de la PPO sont plus élevées pour les mangues mûres (Hossain et al., 2014), d'autant plus que leur pH est plus proche de l'optimum d'activité de la PPO (Park et al., 1980).

- **Le séchage « chaud »**

Avec une température de 80 °C et une a_w faible en fin de cycle de séchage, les résultats attendus pour ce diagramme étaient un brunissement non enzymatique plus soutenu quelle que soit la maturité mais surtout pour les mangues mûres contenant plus de sucres réducteurs, de protéines et de caroténoïdes (Rosalie et al., 2018; Yungyuen et al., 2021). L'effet faible obtenu avec des variations de couleur limitées mais plus importantes pour les mangues immatures pourrait venir de la durée d'application de cette température. Elle est relativement courte (1 h) comparée à d'autres études qui ont obtenu des effets très significatifs de l'augmentation de la température de séchage au bout de 95 minutes (Izli et al., 2017). La figure 21 représentant l'évolution des pertes de masse lors du séchage de mangues à différents stades de maturité pourrait en partie

expliquer les différences de comportements de la couleur des mangues immatures par rapport aux mangues à maturité plus avancées. A 60 °C / 30 % HR, les mangues immatures atteignent la valeur limite d'humidité 1 h avant les mangues les plus mûres. Le brunissement plus prononcé des mangues vertes à 80 °C pourrait venir du fait qu'elles aient été soumises à des durées plus longues sous la contrainte des valeurs d'humidité faibles plus favorables à la réaction de Maillard selon (Korbel et al., 2013a).

III. Le pré- et le post-récolte sont les leviers d'amélioration de la qualité des mangues sèches naturelles et de la disponibilité en matières premières

Contrairement à d'autres types de mangues séchées, le goût, l'arôme et la couleur des mangues sèches naturelles ne peuvent pas être corrigés par un ajout de sucres, d'arômes et d'autres conservateurs. Le séchage, sous réserve de disposer d'un séchoir performant capable d'appliquer des paramètres optimaux, permet au mieux de conserver les caractéristiques des mangues fraîches. Il est donc nécessaire de disposer de mangues de bonne qualité avec un rapport sucre/acide élevé et une couleur orangée par des teneurs en caroténoïdes élevées pour qu'en sortie de séchage les mangues sèches disposent des mêmes caractéristiques sensorielles. L'approche complémentaire à celle portant sur le séchage a été l'étude de l'effet de la variété, du stade de maturité à la récolte, de l'avancement dans la saison, de la température et de la durée de maturation sur qualité des mangues fraîches. Les effets des facteurs prépondérants à l'élaboration de qualité, seuls ou en combinaison et les dynamiques d'évolution quantitative des paramètres responsables de la qualité organoleptique ont été analysés.

L'étude de deux variétés (cvs. Cogshall et Kent) a permis de préciser l'importance du choix variétal sur la construction de la qualité et l'organisation des flux de production. La variété Kent de stade vert-mature a une durée de vie en maturation significativement plus longue que celle de la variété Cogshall de stades vert-mature et point-jaune (entre 3 à 8 jours de plus à 20 °C et 2 à 6 jours de plus à 35 °C). La variété Kent est d'ailleurs très appréciée sur le marché international du fait de cette caractéristique de durée de vie commerciale (Rey et al., 2007). Elle fait partie des variétés de mangues séchées les plus présentes dans le marché européen selon Arnoldus et al. (2009) à cause des exportations Sud-Africaine en mangue sèches conventionnelles. Cette étude relève aussi la plus grande disponibilité en mangues biologiques de la variété Kent dans les pays d'Afrique de l'Ouest en comparaison à leurs principaux concurrents avec des issues des filières d'export bien organisées. Avec l'expansion de cette filière dans les pays comme le Sénégal, les producteurs de mangues séchées de cette zone

pourraient bénéficier de cet avantage concurrentiel pour renforcer leur place dans le segment des fruits séchés biologiques.

A 20 °C, les valeurs de °Brix ne sont pas significativement différentes entre les deux variétés au stade vert-mature en accord avec les travaux de Rosalie et al. (2013). La maturation à 35 °C a permis une meilleure expression du potentiel sucre qu'à 20 °C. C'est aussi la température la plus élevée qui conduit à la couleur la plus pure et orangée pour la variété Kent. Cette différence entre variétés est probablement liée à la teneur en caroténoïdes plus importante de la variété Kent par rapport à la variété Cogshall (Rosalie et al., 2013).

Notre étude a logiquement montré que la qualité évolue de manière croissante avec le stade de maturité à la récolte, en cohérence avec les études de Léchaudel et al. (2010) et Medlicott et al. (1990). Plus le temps d'accumulation de métabolites sur l'arbre avant la récolte est long, plus les fruits ont des caractéristiques organoleptiques intéressantes après la maturation. Après des maturations plus courtes, les mangues récoltées aux stades les plus avancés expriment leur potentiel en °Brix plus élevé et en couleur, plus orangé. Ce qui est ressorti de manière originale est que l'utilisation de la maturité à la récolte n'est pas suffisante pour estimer le potentiel de qualité des mangues. Pour une même maturité à la récolte, les fruits récoltés à des moments plus avancés dans la saison ont eu des caractéristiques différentes après la maturation. Notre étude a montré qu'en début de saison de production, les fruits ont des potentiels en sucres et en couleur moins élevés qu'en pleine saison. Ensuite, jusqu'à la fin de la saison, ces potentiels restent stables. Il existe très peu d'études qui ont suivi l'évolution de la qualité des mangues récoltées avec le même indice de maturité à la récolte à des moments différents de la saison. La difficulté réside dans la mesure de la maturité à la récolte.

L'augmentation de la température de maturation a eu un impact très positif sur la qualité des mangues. La maturation à 35 °C a permis d'obtenir des mangues plus sucrées et plus orangées. L'augmentation de l'activité métabolique aux températures élevées lors de dégradation de l'amidon en sucres simples et de la synthèse des caroténoïdes (Fu et al., 2019; Hossain et al., 2014) serait responsable de l'amélioration de la qualité sur une durée plus courte (Baloch and Bibi, 2012).

Si une récolte, en dehors du début de saison, de mangues à des stades de maturité avancés, et combinée à une maturation à des températures élevées permet d'augmenter nettement la qualité des fruits à sécher, la durée de maturation courte peut être un inconvénient pour les unités de séchage. A cause des durées de maturation longues en début de saison, il est nécessaire d'accélérer la maturation avec des températures élevées pour disposer assez rapidement de

mangues de qualité pour pouvoir remplir les séchoirs. A la fin du pic de récolte, une maturation à 20 °C peut servir à prolonger la campagne de séchage, mais avec une qualité moindre. La conservation au froid de mangues avec des caractéristiques optimales pourrait aussi être une solution comme le montre notre étude. Il a été démontré qu'un stockage de ces mangues à 12 °C est possible pendant 11 jours sans altération de qualité technologique. Au-delà du °Brix, de l'acidité titrable et de la couleur qui sont restés stables pendant cette période, la fermeté des mangues permettant un pelage aisé a été conservée. Selon la bibliographie, la conservation de la structure de la peau pourrait provenir de la diminution à température basse des activités autolytiques qui sont responsables des dégradations (Baswal et al., 2020; Devanesan et al., 2011). Au cours de l'étude, aucun problème de maladies du froid (Mohammed and Brecht, 2002) ni de défaut de maturation (Nunes et al., 2007) n'a été rencontré, alors qu'ils se posent parfois sur les mangues exportées par cargo et muries ensuite. Commencer par réaliser la maturation réduit logiquement ces risques, mais cela n'est possible qu'en l'absence de risque d'atteintes physiques telles que celles subies au cours des transports : les mangues mûres sont plus fragiles que les mangues de stade vert-mature. La conservation de fruits presque prêts à être transformés est susceptible de faciliter sensiblement l'organisation de l'activité d'une unité de séchage en jouant le rôle tampon / amortisseur entre l'approvisionnement – maturation et la transformation – séchage. Alors que le débit de la transformation – séchage doit être régulier afin d'exploiter au mieux l'entièreté de la capacité de séchage, l'approvisionnement – maturation pourrait avoir un débit journalier variable. L'important serait alors que le débit moyen de l'amont sur plusieurs jours corresponde à la capacité de séchage. Dans cette logique, une variabilité des conditions de maturation serait peu gênante si ce n'est sur la qualité ; au mieux, les meilleures conditions de maturation pourraient être utilisées, quelles que soient les mangues entrant dans l'unité. Un avantage supplémentaire peut être dégagé : la durée de la campagne de séchage pourrait être prolongée, alors que pour une variété, elle n'est que de l'ordre de 20 jours. Pour tester l'intérêt opérationnel et économique d'une conservation entre maturation et transformation, de bonnes compétences en production de température dirigée seraient nécessaires afin d'explorer correctement les montants d'investissements et coûts de fonctionnement d'installations classiques ou basées sur des aéroréfrigérants, alimentés continuellement en électricité ou au fil de l'eau par des panneaux photovoltaïques. Nos travaux seraient utilement élargis vers d'autres conditions, depuis la limite basse imposée par l'absence de dégât par le froid, jusqu'aux températures constatées dans les magasins des unités.

IV. Limites et perspectives

Nos résultats confirment l'importance du continuum de recherche depuis le pré-récolte jusqu'à la transformation en intégrant le post-récolte pour pouvoir proposer des produits transformés de la meilleure qualité possible. Cependant, la démarche expérimentale menée s'avère lourde et complexe. Même avec la simplification qu'autorisent les premières approches, il est nécessaire de combiner des compétences en génie des procédés et en physiologie végétale, domaines scientifiques jusqu'alors nettement séparés. Nos dispositifs et protocoles ont été suffisants pour démontrer l'effet mineur des paramètres pré- et post-récolte sur le comportement des mangues lors du séchage mais ils comportent des limites pour la compréhension des mécanismes physiologiques lors de la maturation.

La lourdeur des essais à conduire sur une période courte de production a empêché le suivi de certains paramètres indissociables du stade physiologique du fruit lors de la maturation et modulant les paramètres environnementaux. C'est le cas du suivi de l'humidité relative de l'air dans les chambres de maturation, surtout en début de saison où la conductance cuticulaire des fruits est élevée (Léchaudel et al., 2013). Pouvoir piloter l'humidité relative pour étudier la balance entre limitation de la perte de masse et développement de pathologies des fruits serait utile pour évaluer la balance intérêts / risques. Les mesures des intensités respiratoires des fruits (production de CO₂) et de la production d'éthylène apporteraient des précisions sur la maturité, pour la relier à l'évolution des différents métabolites d'intérêt associés à la qualité des mangues fraîches et sèches. Cela pourrait permettre de prédire les durées de maturation, en intégrant l'effet de facteurs tels que ceux que nous avons étudiés. Ces mesures permettraient également de disposer d'indicateurs de maturité pour constituer des lots homogènes en post-récolte, mais elles sont contraignantes à mettre en place sur un grand nombre de fruits.

Une autre voie pour augmenter le nombre de fruits suivis en post-récolte et disposer de critères robustes de la qualité des fruits est l'amélioration des méthodes d'évaluation de la maturité des fruits. Par exemple, sur une même mangue, une évaluation du potentiel en sucres par Spectrométrie Proche InfraRouge (SPIR) à la récolte (Nordey et al., 2019) puis un suivi par la même technique des sucres ferait ressortir la fin de la conversion de l'amidon en sucres. Possiblement, le délai à cette fin de conversion pourrait être prédite à partir des mesures sur les premiers jours d'observation de la maturation. De nombreuses études publiées récemment tentent d'inclure des paramètres pré- et post-récolte tels que la variété, l'avancement dans la saison, le lieu de production dans le développement de leurs modèles (Anderson et al., 2021;

Sivaranjani et al., 2021; Sohaib Ali Shah et al., 2021). Les techniques hyperspectrales devraient aussi apporter des progrès.

Il serait aussi utile d'étudier l'effet du pré-post-récolte sur l'arôme et la texture des mangues sèches naturelles. Pour suivre la modification des arômes au séchage, faute de pouvoir conduire nos essais sur des mangues de la variété cv. Amélie (Burkina Faso), il aurait fallu reproduire une partie importante des travaux réalisés par Adeline Bonneau. (2016) dans sa thèse : identification des composés caractéristiques des arômes des variétés de mangues travaillées, puis dosages sur frais et sur sec. La consommation de temps aurait été trop importante. Pour la texture, une étude exploratoire avait été menée en début de thèse pour tester la possibilité de corriger la dépendance de la texture des mangues sèches à la teneur en eau. Des tranches de mangues de 4 mm d'épaisseur ont été séchées dans nos conditions standard et sorties à différents instants afin d'obtenir différentes teneurs en eau. Après stabilisation / équilibre, des éprouvettes de type H3 ont été découpées sur l'axe apex – pédoncule et passées en essais de traction. Les forces mesurées ont été normalisées en fonction de la section en matière sèche des éprouvettes (même largeur, mais de teneurs en eau différentes). L'importante dispersion des mesures visible à la figure 22 a conduit à ne pas poursuivre la démarche. Il aurait été possible de tenter de tenir compte de la distance de la tranche au noyau mais très probablement, la variabilité aurait été encore trop importante pour laisser espérer de pouvoir évaluer les différences de texture induites par facteurs pré- et post-récolte.

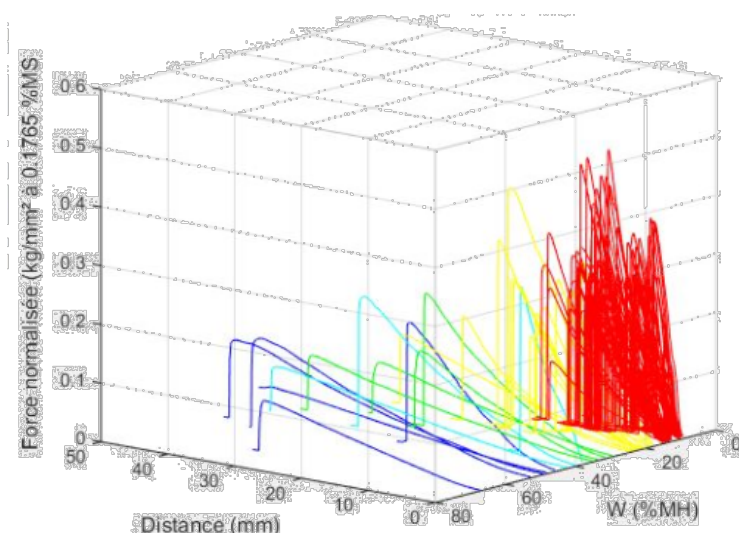


Figure 22: Essais de traction d'éprouvettes h3 de mangue de différentes humidités.

Juste pouvoir faciliter la reproduction d'essais tels que ceux que nous avons menés serait déjà un progrès important. Il serait alors envisageable de réaliser une exploration plus complète, sur

des échantillons d'effectif plus important, pour établir un modèle de développement de qualité en fonction des facteurs pré- et post récolte. L'analyse colorimétrique sur image 2D, ou encore mieux l'imagerie SPIR - visible ou hyperspectrale en 2D. Elles sont désormais accessibles. Les apports du SPIR et de l'hyperspectral seraient très importants. Ces techniques nécessitent cependant des phases d'établissement et de validation de modèles lourdes et longues mais les risques d'échec peuvent être limités si de bons résultats ont déjà été obtenus en 1D. Le SPIR – visible devrait pouvoir fournir avec précision la couleur (Sarkar et al., 2021), la teneur en matière sèche, le °Brix, et avec une incertitude un peu plus importante l'acidité titrable (Nordey et al., 2019).

Conclusion générale

Conclusion générale

Les sécheurs de mangues savent qu'il faut une bonne matière première et un bon séchage pour obtenir des mangues sèches naturelles de qualité. Mais qu'est-ce qu'un bon séchage ? Et comment obtenir des mangues fraîches de bonne qualité, alors que la maturité des mangues approvisionnées est variable et non-mesurable et que, chaque jour, il faut remplir complètement les séchoirs sans jeter de mangues ? Les connaissances manquaient. Les contributions relatives de la matière première et du séchage dans la formation de la qualité des mangues sèches n'étaient pas quantifiées. Par ailleurs, il existe peu de données sur la relation entre les conditions de maturation et la qualité des mangues obtenues. Notre thèse est une contribution pour combler ces manques de connaissances.

Nos travaux se sont centrés sur la couleur, critère de qualité limitant de la commercialisation des mangues sèches naturelles. Nos résultats montrent d'abord qu'un « bon » séchage conserve très bien la couleur de la pulpe des mangues fraîches, quelle que soit cette couleur et quelles que soient ses origines. Aucun des facteurs, variété, avancement dans la saison, stade de maturité à la récolte ni température de maturation ne provoque de brunissement au séchage de tranches de mangues à 60 °C et 30% d'humidité relative pendant 5 h. La couleur initiale qui est fortement dépendante des paramètres pré-récolte et post-récolte est déterminante de celle des produits secs, les modifications induites par le séchage étant quasiment négligeables. A partir de ce résultat, deux orientations de recherche ont été suivies.

La première orientation de recherche a visé à développer des connaissances sur l'effet des paramètres pré-post-récolte sur l'opération unitaire qu'est la maturation : durée et évolution de la qualité des mangues fraîches à travers des indices physico-chimiques et colorimétriques. La conservation avant séchage de mangues mûres était un prolongement logique. Une démarche expérimentale a permis d'identifier les facteurs qui sont à l'origine de la qualité des mangues mais aussi d'obtenir des données sur les durées d'obtention d'une qualité souhaitée en fonction du produit final visé. Des récoltes à maturité avancée (point-jaune) ainsi qu'après le début de saison permettent d'obtenir avec une durée de maturation moindre, des mangues plus sucrées, plus orangées et aux pertes de masse plus faibles. Le possible a été fait pour essayer de synthétiser nos résultats sous la forme d'un modèle numérique mais malgré l'extrême lourdeur expérimentale que nous avons assumée, les données ne sont pas assez complètes. Les orientations et conseils resteront alors qualitatifs.

La maturation à 35 °C conduit à une qualité supérieure à celle obtenue à 20°C quel que soit le pré-récolte, sauf les pertes de masses qui sont plus élevées. Réaliser la maturation à une

humidité relative élevée réduirait ces pertes mais augmenterait le risque de développement de microorganismes pathogènes. Des pertes de masse un peu élevées seraient problématiques pour les distributeurs et détaillants de fruits frais car ils sont vendus au poids. Dans le cadre du séchage, elle n'a pas d'impact pour le transformateur car le séchage vise à réduire encore plus bas la teneur en eau. La matière sèche qui est le plus important pour le transformateur est conservée. Le même raisonnement peut être tenu pour les pertes en eau subies par les mangues mûres lorsqu'elles sont conservées à 12 °C. L'évaluation de son intérêt n'est pas triviale même si la qualité est maintenue et que les coûts d'un dispositif de température dirigée peuvent être évalués sans difficulté importante. Un bilan négatif pourrait être compensé voire devenir nettement positif du fait de l'allongement de la durée de campagne de séchage, d'une qualité plus constante et du report de l'attention jusqu'alors mobilisée par l'interface approvisionnement – séchage au sens propre. Il serait bien utile de compléter nos résultats à d'autres températures, depuis la température limite d'atteintes aux mangues jusqu'aux conditions actuellement mises en œuvre.

La seconde orientation de recherche a porté sur les modifications de qualité induites par des séchages non-optimaux. Les conséquences sur la couleur des deux défauts de séchage les plus couramment rencontrés ont été quantifiées. La modélisation des cinétiques de brunissement non-enzymatique n'a pas pu être menée à terme (Annexe 2) du fait de la complexité des expérimentations et de limites matérielles. Néanmoins, la démarche menée constitue une très bonne base pour l'obtention de ces cinétiques, qui ne sont pas disponibles alors qu'elles sont impliquées, craintes ou recherchées, dans de très nombreuses transformations d'aliments. Un premier séchage défectueux rencontré souvent en unité de production a été testé : puissance de chauffe et ventilation faible comparativement à la charge de produits à sécher. Pour la simulation expérimentale, un séchage ralenti par une humidité trop élevée au début du séchage pendant 1 h (60 °C/ 60 % HR) puis terminée à 60 °C / 30% HR pendant 4 h a été effectué sur des mangues de maturités différentes. L'effet escompté de ce séchage sur la couleur a été quantifié et il en ressort un brunissement des mangues prononcé surtout pour les mangues à maturité avancée. Les conditions humides de séchage, et l'état du produit (humide) montrent qu'il s'agit d'un brunissement enzymatique. Il n'y a par contre pas eu de « maturation accélérée » des mangues immatures, dont on aurait pu attendre une amélioration de la couleur. Le deuxième diagramme testé est semblable à celui appliqué dans beaucoup de sites de production pour augmenter la productivité en accélérant la fin de séchage (diffusion de l'eau plus rapide aux hautes températures). 80 °C / 30 % HR a été appliqué pendant la dernière heure de séchage après un début à 60 °C / 30 % pendant 4 h. Il en est ressorti un brunissement

significatif, affectant toutes les mangues quelle que soit leur maturité. En fin de séchage, une haute température combinée à une activité de l'eau proche de 0,6 augmente les réactions de Maillard. L'effet est légèrement plus important pour les mangues les moins mûres. Une interprétation possible serait une domination de l'accélération du séchage par rapport à la concentration plus faible en sucres réducteurs.

Au bilan, les connaissances créées sont susceptibles d'aider les sécheurs de mangues à obtenir chaque jour et avec des écarts faibles, des mangues sèches naturelles d'aussi bonne qualité que possible en fonction des approvisionnements. Cependant, le processus nécessite de disposer de lieux d'entreposage en température dirigée. Il est aussi nécessaire que les connaissances soient portées vers eux : encore une *interface* qui a une grande importance.

Références bibliographiques

- Akoy, E.-A.O.M., Von Hörsten, D., Luecke, W., 2008. Drying Kinetics and Colour Change of Mango Slices as Affected by Drying Temperature and Time, in: The 2008 Tropentag International Conference on “Competition for Resources in a Changing World: New Drive for Rural Development” Hohenheim, Germany. pp. 7–9.
- Ali, A., Muhammad, M.T.M., Sijam, K., Siddiqui, Y., 2011. Effect of chitosan coatings on the physicochemical characteristics of Eksotika II papaya (*Carica papaya* L.) fruit during cold storage. *Food Chemistry* 124, 620–626. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.085>
- Ambuko, J., Karithi, E., Hutchinson, M., Owino, W., 2018. Modified Atmosphere Packaging Enhances the Effectiveness of Coolbot™ Cold Storage to Preserve Postharvest Quality of Mango Fruits. *Journal of Food Research* 7, p7. <https://doi.org/10.5539/jfr.v7n5p7>
- Amwoka, E.M., Ambuko, J.L., Jesang, H.M., Owino, W.O., 2021. Effectiveness of Selected Cold Chain Management Practices to Extend Shelf Life of Mango Fruit. *Advances in Agriculture* 2021, e8859144. <https://doi.org/10.1155/2021/8859144>
- Anderson, N.T., Walsh, K.B., Flynn, J.R., Walsh, J.P., 2021. Achieving robustness across season, location and cultivar for a NIRS model for intact mango fruit dry matter content. II. Local PLS and nonlinear models. *Postharvest Biology and Technology* 171, 111358. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111358>
- Arnoldus, M., Van der Pol, F., Kima, B., Nana, V., Soufountera, M., 2009. Amélioration des performances de la filière des produits transformés de la mangue au Burkina Faso et au Mali. Une étude pour la Banque Mondiale, le PCDA et le PAFASP, financée par l’Union Européenne.
- Baldwin, E.A., Burns, J.K., Kazokas, W., Brecht, J.K., Hagenmaier, R.D., Bender, R.J., Pesis, E., 1999. Effect of two edible coatings with different permeability characteristics on mango (*Mangifera indica* L.) ripening during storage. *Postharvest Biology and Technology* 17, 215–226. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(99\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(99)00053-8)
- Bally, I.S., 2006. *Mangifera indica* (mango). Species profiles for pacific island agroforestry 1–25.
- Bally, I.S.E., Lu, P., Johnson, P.R., 2009. Mango Breeding, in: Jain, S.M., Priyadarshan, P.M. (Eds.), *Breeding Plantation Tree Crops: Tropical Species*. Springer New York, New York, NY, pp. 51–82. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71201-7_2
- Baloch, M.K., Bibi, F., 2012. Effect of harvesting and storage conditions on the post harvest quality and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *South African Journal of Botany* 83, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2012.08.001>
- Baltazari, A., Mtui, H., Chove, L., Msogoya, T., Kudra, A., Tryphone, G., Samwel, J., Paliyath, G., Sullivan, A., Subramanian, J., Mwatawala, M., 2020. Evaluation of Post-harvest Losses and Shelf Life of Fresh Mango (*Mangifera indica* L.) in Eastern Zone of Tanzania. *International Journal of Fruit Science* 20, 855–870. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1697411>
- Baswal, A.K., Dhaliwal, H.S., Singh, Z., Mahajan, B., 2020. Influence of Types of Modified Atmospheric Packaging (MAP) Films on Cold-Storage Life and Fruit Quality of ‘Kinnow’ Mandarin (*Citrus nobilis* Lour X *C. deliciosa* Tenora). *International Journal of Fruit Science* 20, S1552–S1569. <https://doi.org/10.1080/15538362.2020.1818163>
- Bechoff, A., Westby, A., Owori, C., Menya, G., Dhuique-Mayer, C., Dufour, D., Tomlins, K., 2009. Effect of drying and storage on the degradation of total carotenoids in orange-

- fleshed sweetpotato cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 90, 622–629. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3859>
- Bellion, I.R., 1992. KINETICS OF THE SULPHITE-INHIBITED MAILLARD REACTION 358.
- Billaud, C., Maraschin, C., Peyrat-Maillard, M.-N., Nicolas, J., 2005. Maillard Reaction Products Derived from Thiol Compounds as Inhibitors of Enzymatic Browning of Fruits and Vegetables: The Structure-Activity Relationship. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1043, 876–885. <https://doi.org/10.1196/annals.1333.099>
- Bonazzi, Catherine, Bimbenet, J.-J., 2003. Séchage des produits alimentaires - Principes 17.
- Bonazzi, C., Bimbenet, J.J., 2003. Drying of foods. Principles. *Techniques de l'Ingénieur. Agroalimentaire (France)*.
- Bonneau, A., 2016. 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. Université Montpellier.
- Bonneau, A., Boulanger, R., Lebrun, M., Maraval, I., Gunata, Z., 2016. Aroma compounds in fresh and dried mango fruit (*Mangifera indica* L. cv. Kent): impact of drying on volatile composition. *International journal of food science & technology* 51, 789–800.
- Bower, J.P., Dennison, M.T., Fowler, K., 2002. Avocado and mango cold storage damage as related to water loss control, in: XXVI International Horticultural Congress: Issues and Advances in Postharvest Horticulture 628. pp. 401–406.
- Byrne, D.H., Nikolic, A.N., Burns, E.E., 1991. Variability in Sugars, Acids, Firmness, and Color Characteristics of 12 Peach Genotypes. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 116, 1004–1006. <https://doi.org/10.21273/JASHS.116.6.1004>
- Caparino, O.A., Tang, J., Nindo, C.I., Sablani, S.S., Powers, J.R., Fellman, J.K., 2012. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. *Journal of Food Engineering* 111, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010>
- Cheema, S., Sommerhalter, M., 2015. Characterization of polyphenol oxidase activity in Ataulfo mango. *Food Chemistry* 171, 382–387. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.011>
- Chen, J.P., Tai, C.Y., Chen, B.H., 2007. Effects of different drying treatments on the stability of carotenoids in Taiwanese mango (*Mangifera indica* L.). *Food Chemistry* 100, 1005–1010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.10.056>
- Corzo, O., Álvarez, C., 2014. Color Change Kinetics of Mango at Different Maturity Stages during Air Drying: Color Kinetics of Mango. *Journal of Food Processing and Preservation* 38, 508–517. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00801.x>
- Cosme Silva, G.M., Silva, W.B., Medeiros, D.B., Salvador, A.R., Cordeiro, M.H.M., da Silva, N.M., Santana, D.B., Mizobutsi, G.P., 2017. The chitosan affects severely the carbon metabolism in mango (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) fruit during storage. *Food Chemistry* 237, 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.123>
- Dea, S., Brecht, J.K., Cecilia do Nascimento Nunes, M., Baldwin, E.A., 2013. Optimal Ripeness Stage for Processing 'Kent' Mangoes into Fresh-cut Slices. *HortTechnology* 12–23. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.1.12>
- Defraeye, T., 2017. Impact of size and shape of fresh-cut fruit on the drying time and fruit quality. *Journal of Food Engineering* 210, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.004>
- Del Pino, M., Bienvenido, C., Boyero, J.R., Vela, J.M., 2020. Biology, ecology and integrated pest management of the white mango scale, *Aulacaspis tubercularis* Newstead, a new

- pest in southern Spain - a review. *Crop Protection* 133, 105160. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105160>
- Derardja, A. eddine, Pretzler, M., Kampatsikas, I., Barkat, M., Rompel, A., 2019. Inhibition of apricot polyphenol oxidase by combinations of plant proteases and ascorbic acid. *Food Chemistry: X* 4, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2019.100053>
- Desmorieux, H., 1992. Le séchage en zone subsaharienne: une analyse technique à partir des réalités géographiques et humdaines. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Desmorieux, H., Diallo, C., Coulibaly, Y., 2008. Operation simulation of a convective and semi-industrial mango dryer. *Journal of Food Engineering* 89, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.04.007>
- Devanesan, J.N., Karuppiyah, A., Abirami, C.K., 2011. Effect of storage temperatures, O₂ concentrations and variety on respiration of mangoes. *Journal of Agrobiology* 28, 119–128.
- Dick, E., N'DaAdopo, A., Camara, B., Moudioh, E., 2009. Influence of maturity stage of mango at harvest on its ripening quality. *Fruits* 64, 13–18. <https://doi.org/10.1051/fruits/2008045>
- Diop, A., Méot, J.-M., Léchaudel, M., Chiroleu, F., Ndiaye, N.D., Mertz, C., Cissé, M., Chillet, M., 2021. Impact of Preharvest and Postharvest on Color Changes during Convective Drying of Mangoes. *Foods* 10, 490. <https://doi.org/10.3390/foods10030490>
- Dissa, A.O., Desmorieux, H., Almeck, A., Bathiebo, J., 2010. Drying of “Amelie” mango (*Mangifera Indica* L.): Influence of temperature on drying rates and shrinkage curves from 50 to 90°C. 11.
- Dissa, A.O., Desmorieux, H., Bathiebo, J., Koulidiati, J., 2008a. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. ‘Amelie’) with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 88, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.008>
- Dissa, A.O., Desmorieux, H., Degraeve, P., Bathiebo, J., Koulidiati, J., 2011. Impact of Fruit Ripeness on Physicochemical Properties and Convective Drying Characteristics of Kent Mango (*Mangifera indica* L. cv. ‘Kent’). *International Journal of Food Engineering* 7. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.2126>
- Ellong, E.N., Adenet, S., Rochefort, K., 2015. Physicochemical, Nutritional, Organoleptic Characteristics and Food Applications of Four Mango (*Mangifera indica*) Varieties. *Food and Nutrition Sciences* 6, 242–253. <https://doi.org/10.4236/fns.2015.62025>
- Elsheshetawy, H.E., Mossad, A., Elhelew, W.K., Farina, V., 2016. Comparative study on the quality characteristics of some Egyptian mango cultivars used for food processing. *Annals of Agricultural Sciences* 61, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2016.04.001>
- Famiani, F., Battistelli, A., Moscatello, S., Cruz-Castillo, J.G., Walker, R.P., 2015. The organic acids that are accumulated in the flesh of fruits: occurrence, metabolism and factors affecting their contents - a review. *Revista Chapingo. Serie horticultura* 21, 97–128. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.01.004>
- Fратиanni, A., Adiletta, G., Di Matteo, M., Panfili, G., Niro, S., Gentile, C., Farina, V., Cinquanta, L., Corona, O., 2020. Evolution of Carotenoid Content, Antioxidant Activity and Volatiles Compounds in Dried Mango Fruits (*Mangifera Indica* L.). *Foods* 9, 1424. <https://doi.org/10.3390/foods9101424>
- FruiTrop, 2014. Commercialisation de la mangue Le mûr à point.
- Fu, X., Cheng, S., Feng, C., Kang, M., Huang, B., Jiang, Y., Duan, X., Grierson, D., Yang, Z., 2019. Lycopene cyclases determine high α -/ β -carotene ratio and increased carotenoids

- in bananas ripening at high temperatures. *Food Chemistry* 283, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.121>
- 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>
- González-Aguilar, G.A., Wang, C.Y., Buta, J.G., 2000. Maintaining Quality of Fresh-Cut Mangoes Using Antibrowning Agents and Modified Atmosphere Packaging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48, 4204–4208. <https://doi.org/10.1021/jf991384j>
- Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikantan, M.R., Ilyas, S.M., 2006. Thin-layer Drying Kinetics of Raw Mango Slices. *Biosystems Engineering* 95, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.05.001>
- Hatton, T.T., Campbell, C.W., 1965. Ripening and Storage of Florida Mangos. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Hernández, J.A., Pavón, G., García, M.A., 2000. Analytical solution of mass transfer equation considering shrinkage for modeling food-drying kinetics. *Journal of Food Engineering* 45, 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00033-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00033-9)
- Hor, S., Léchaudel, M., Mith, H., Bugaud, C., 2020a. Fruit density: A reliable indicator of sensory quality for mango. *Scientia Horticulturae* 272, 109548. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109548>
- Horner, W.F.A., 1997. Preservation of fish by curing (drying, salting and smoking), in: Hall, G.M. (Ed.), *Fish Processing Technology*. Springer US, Boston, MA, pp. 32–73. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1113-3_2
- Hossain, Md.A., Rana, Md.M., Kimura, Y., Roslan, H.A., 2014. Changes in Biochemical Characteristics and Activities of Ripening Associated Enzymes in Mango Fruit during the Storage at Different Temperatures. *BioMed Research International* 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/232969>
- Izli, N., Izli, G., Taskin, O., 2017. Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Science and Technology* 37, 604–612. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.28316>
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Haewsungcharern, M., Bala, B.K., Müller, J., 2008b. Finite element simulation of drying of mango. *Biosystems Engineering* 99, 523–531. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.12.010>
- Jha, S.K., Sethi, S., Srivastav, M., Dubey, A.K., Sharma, R.R., Samuel, D.V.K., Singh, A.K., 2010. Firmness characteristics of mango hybrids under ambient storage. *Journal of Food Engineering* 97, 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.011>
- Joas, J., Caro, Y., Léchaudel, M., 2009. Comparison of postharvest changes in mango (cv Cogshall) using a Ripening class index (Rci) for different carbon supplies and harvest dates. *Postharvest Biology and Technology* 54, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.04.008>
- Joas, J., Lechaudel, M., 2009. La récolte et la conservation.
- Joas, J., Vulcain, E., Desvignes, C., Morales, E., Léchaudel, M., 2012. Physiological age at harvest regulates the variability in postharvest ripening, sensory and nutritional characteristics of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Cogshall due to growing conditions: Effect of physiological age at harvest on mango characteristics. *J. Sci. Food Agric.* 92, 1282–1290. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4696>

- Joas, J., Vulcain, E., Léchaudel, M., 2013. Effect of fruit position in the canopy on physiological age and physicochemical composition of mango “Cogshall.” *Acta Hort.* 123–128. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.992.14>
- Kameni, A., Mbofung, C.M., Ngnamtam, Z., Doassem, J., Hamadou, L., 2003. Aptitude au séchage des fruits de quelques variétés de manguiers cultivées au Cameroun. *Fruits* 58, 89–98. <https://doi.org/10.1051/fruits:2002039>
- Kanyinda, J.N.M., 2017. Comparison of Two Drying Methods of Mango (Oven and Solar Drying). *MOJFPT* 5. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2017.05.00118>
- Ketsa, S., Chidtragool, S., Klein, J.D., Lurie, S., 1999. Firmness, pectin components and cell wall hydrolases of mango fruit following low-temperature stress. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 74, 685–689. <https://doi.org/10.1080/14620316.1999.11511173>
- Kim, Y., Brecht, J.K., Talcott, S.T., 2007. Antioxidant phytochemical and fruit quality changes in mango (*Mangifera indica* L.) following hot water immersion and controlled atmosphere storage. *Food Chemistry* 105, 1327–1334. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.050>
- Koffi, K., Jean Mathias, Soro, D., Fondio, L., N’da Adopo, A., Malézieux, É., Faye, E., 2021. Effect of the length of the flowering-harvest interval on the ripening and quality of the “Kent” mango in Côte d’Ivoire. *JEBAS* 9, 138–146. [https://doi.org/10.18006/2021.9\(2\).138.146](https://doi.org/10.18006/2021.9(2).138.146)
- Korbel, E., 2014. Étude du brunissement enzymatique et non-enzymatique de la mangue au cours du procédé de séchage par une approche en milieu modèle reconstitué (Thèse). Montpellier II, Montpellier.
- Korbel, E., Attal, E.-H., Grabulos, J., Lluberas, E., Durand, N., Morel, G., Goli, T., Brat, P., 2013a. Impact of temperature and water activity on enzymatic and non-enzymatic reactions in reconstituted dried mango model system. *European Food Research and Technology* 237, 39–46. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-2026-6>
- Korbel, E., Attal, E.-H., Grabulos, J., Lluberas, E., Durand, N., Morel, G., Goli, T., Brat, P., 2013b. Impact of temperature and water activity on enzymatic and non-enzymatic reactions in reconstituted dried mango model system. *European Food Research and Technology* 237, 39–46. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-2026-6>
- Korbel, E., Servent, A., Billaud, C., Brat, P., 2013c. Heat Inactivation of Polyphenol Oxidase and Peroxidase as a Function of Water Activity: A Case Study of Mango Drying. *Drying Technology* 31, 1675–1680. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.808659>
- Kotwaliwale, N., Kalne, A., Singh, K., 2012. Monitoring of mango (*Mangifera indica* L.) (Cv.: Chousa) ripening using X-ray computed tomography, in: 2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST). Presented at the 2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST), pp. 326–330. <https://doi.org/10.1109/ICSensT.2012.6461696>
- Kour, R., Singh, M., Gill, P.P.S., Jawandha, S.K., 2018. Ripening quality of Dusehri mango in relation to harvest time. *J Food Sci Technol* 55, 2395–2400. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3156-4>
- Kwak, E.-J., Lim, S.-I., 2004. The effect of sugar, amino acid, metal ion, and NaCl on model Maillard reaction under pH control. *Amino Acids* 27, 85–90. <https://doi.org/10.1007/s00726-004-0067-7>
- 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 and Bioproducts Processing* 123, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.06.013>
- Labuza, T.P., Saltmarch, M., 1981. The nonenzymatic browning reaction as affected by water in foods, in: *Water Activity: Influences on Food Quality*. Elsevier, pp. 605–650. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-591350-8.50029-2>
- Lalel, Herianus J. D, Singh, Z., Tan, S.C., 2003. Glycosidically-bound aroma volatile compounds in the skin and pulp of ‘Kensington Pride’ mango fruit at different stages of maturity. *Postharvest Biology and Technology* 29, 205–218. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00250-8](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00250-8)
- Lalel, H. J. D., Singh, Z., Tan, S.C., Agustí, M., 2003. Maturity stage at harvest affects fruit ripening, quality and biosynthesis of aroma volatile compounds in ‘Kensington Pride’ mango. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78, 225–233. <https://doi.org/10.1080/14620316.2003.11511610>
- Lalel, J.D., Singh, Z., Tan, S.C., 2004. Ripening temperatures influence biosynthesis of aroma volatile compounds in ‘Kensington Pride’ mango fruit. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 79, 146–157. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511729>
- Lauricella, M., Emanuele, S., Calvaruso, G., Giuliano, M., D’Anneo, A., 2017. Multifaceted Health Benefits of *Mangifera indica* L. (Mango): The Inestimable Value of Orchards Recently Planted in Sicilian Rural Areas. *Nutrients* 9, 525. <https://doi.org/10.3390/nu9050525>
- Lawson, T., Lycett, G.W., Ali, A., Chin, C.F., 2019. Characterization of Southeast Asia mangoes (*Mangifera indica* L) according to their physicochemical attributes. *Scientia Horticulturae* 243, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.014>
- Lebrun, M., Plotto, A., Goodner, K., Ducamp, M.-N., Baldwin, E., 2008. Discrimination of mango fruit maturity by volatiles using the electronic nose and gas chromatography. *Postharvest Biology and Technology* 48, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.010>
- 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 (thesis). INA-PG.
- Léchaudel, M., Genard, M., Lescourret, F., Urban, L., Jannoyer, M., 2005a. Modeling effects of weather and source-sink relationships on mango fruit growth. *Tree Physiology* 25, 583–597. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.5.583>
- Léchaudel, M., Joas, J., 2007. An overview of preharvest factors influencing mango fruit growth, quality and postharvest behaviour. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19, 287–298. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400004>
- Léchaudel, M., Joas, J., 2006. Quality and maturation of mango fruits of cv. Cogshall in relation to harvest date and carbon supply. *Aust. J. Agric. Res.* 57, 419. <https://doi.org/10.1071/AR05159>
- Léchaudel, M., Joas, J., Caro, Y., Génard, M., Jannoyer, M., 2005b. Leaf:fruit ratio and irrigation supply affect seasonal changes in minerals, organic acids and sugars of mango fruit. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 251–260. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1968>
- Léchaudel, M., Lopez-Lauri, F., Vidal, V., Sallanon, H., Joas, J., 2013. Response of the physiological parameters of mango fruit (transpiration, water relations and antioxidant system) to its light and temperature environment. *Journal of Plant Physiology* 170, 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.11.009>

- Léchaudel, 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>
- Leonardi, C., Baille, A., Guichard, S., 2000. Predicting transpiration of shaded and non-shaded tomato fruits under greenhouse environments. *Scientia Horticulturae* 84, 297–307. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00130-2)
- Li, L., Wu, H.-X., Ma, X.-W., Xu, W.-T., Liang, Q.-Z., Zhan, R.-L., Wang, S.-B., 2020. Transcriptional mechanism of differential sugar accumulation in pulp of two contrasting mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *Genomics* 112, 4505–4515. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2020.07.038>
- Lima, L.C. de O., Chitarra, A.B., Chitarra, M.I.F., 2001. Changes in amylase activity starch and sugars contents in mango fruits pulp cv. Tommy Atkins with spongy tissue. *Braz. arch. biol. technol.* 44, 59–62. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132001000100008>
- 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. *Scientia Horticulturae* 129, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.015>
- Ma, X., Zheng, B., Ma, Y., Xu, W., Wu, H., Wang, S., 2018. Carotenoid accumulation and expression of carotenoid biosynthesis genes in mango flesh during fruit development and ripening. *Scientia Horticulturae* 237, 201–206. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.009>
- Mahayothee, B., Neidhart, S., Carle, R., Mühlbauer, W., 2007. Effects of variety, ripening condition and ripening stage on the quality of sulphite-free dried mango slices. *European Food Research and Technology* 225, 723–732. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0475-x>
- Malundo, T.M.M., Shewfelt, R.L., Ware, G.O., Baldwin, E., 2001. Sugars and Acids Influence Flavor Properties of Mango (*Mangifera indica*). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 126, 115–121.
- Manthey, J.A., Perkins-Veazie, P., 2009. Influences of harvest date and location on the levels of beta-carotene, ascorbic acid, total phenols, the in vitro antioxidant capacity, and phenolic profiles of five commercial varieties of mango (*Mangifera indica* L.). *J Agric Food Chem* 57, 10825–10830. <https://doi.org/10.1021/jf902606h>
- Maskan, M., 2001. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48, 169–175. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00154-0)
- Medlicott, A.P., N'Diaye, M., Sigrist, J.M.M., 1990. Harvest Maturity and Concentration and Exposure Time to Acetylene Influence Initiation of Ripening in Mangos. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115, 426–430. <https://doi.org/10.21273/JASHS.115.3.426>
- 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. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 36, 561–566. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740360707>
- Micha, R., Peñalvo, J.L., Cudhea, F., Imamura, F., Rehm, C.D., Mozaffarian, D., 2017. Association Between Dietary Factors and Mortality From Heart Disease, Stroke, and Type 2 Diabetes in the United States. *JAMA* 317, 912. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.0947>

- Michalska, A., Wojdyło, A., Lech, K., Łysiak, G.P., Figiel, A., 2016. Physicochemical properties of whole fruit plum powders obtained using different drying technologies. *Food Chemistry* 207, 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.075>
- Mohammed, M., Brecht, J.K., 2002. Reduction of chilling injury in ‘Tommy Atkins’ mangoes during ripening. *Scientia Horticulturae* 95, 297–308. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00041-9)
- Montanaro, G., Dichio, B., Xiloyannis, C., Lang, A., 2012. Fruit transpiration in kiwifruit: environmental drivers and predictive model. *AoB PLANTS* 2012. <https://doi.org/10.1093/aobpla/pls036>
- Mugodo, K., Workneh, T.S., 2021. The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality. *Heliyon* 7, e07182. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07182>
- Mukherjee, S.K., Litz, R.E., 2009. Introduction: botany and importance. *The mango: Botany, production and uses* 1–18.
- Nagle, M., Intani, K., Romano, G., Mahayothee, B., Sardud, V., Müller, J., 2016. Determination of surface color of ‘all yellow’ mango cultivars using computer vision. *Biol Eng* 9, 9.
- Nambi, V.E., Thangavel, K., Shahir, S., Chandrasekar, V., 2016. Color Kinetics During Ripening of Indian Mangoes. *International Journal of Food Properties* 19, 2147–2155. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1089281>
- Narain, N., Bora, P.S., Narain, R., Shaw, P.E., 1997. *Mango. Tropical and Subtropical Fruits*. AgScience, Auburndale. Florida 1–77.
- Nassur, R. de C.M.R., González-Moscoso, S., Crisosto, G.M., Lima, L.C. de O., Vilas Boas, E.V. de B., Crisosto, C.H., 2015. Describing Quality and Sensory Attributes of 3 Mango (*Mangifera indica* L.) Cultivars at 3 Ripeness Stages Based on Firmness: Ideal mango ripeness stage.... *Journal of Food Science* 80, S2055–S2063. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12989>
- Ndiaye, C., Xu, S.-Y., Wang, Z., 2009. Steam blanching effect on polyphenoloxidase, peroxidase and colour of mango (*Mangifera indica* L.) slices. *Food Chemistry* 113, 92–95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.027>
- Noiwan, D., Suppakul, P., Joomwong, A., Uthaibutra, J., Rachtanapun, P., 2017. Kinetics of Mango Fruits (*Mangifera indica* cv. ‘Nam Dok Mai Si Thong’) Quality Changes during Storage at Various Temperatures. *JAS* 9, 199. <https://doi.org/10.5539/jas.v9n6p199>
- Nordey, T., 2014. Analyse expérimentale et modélisation de l’hétérogénéité de la qualité et de la maturité des mangues (Thesis). Université d’Avignon et des pays de Vaucluse.
- 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 Biology and Technology* 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. *Scientia Horticulturae* 216, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.12.023>
- Nordey, T., Joas, J., Davrieux, F., Génard, M., Léchaudel, M., 2014a. Non-destructive prediction of color and pigment contents in mango peel. *Scientia Horticulturae* 171, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.01.025>
- Nordey, T., Léchaudel, M., Génard, M., Joas, J., 2016. Factors affecting ethylene and carbon dioxide concentrations during ripening: Incidence on final dry matter, total soluble solids content and acidity of mango fruit. *Journal of Plant Physiology* 196–197, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.03.008>

- Nordey, T., Léchaudel, M., Génard, M., Joas, J., 2014b. Spatial and temporal variations in mango colour, acidity, and sweetness in relation to temperature and ethylene gradients within the fruit. *Journal of Plant Physiology* 171, 1555–1563. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.07.009>
- Nordey, T., Léchaudel, M., Saudreau, M., Joas, J., Génard, M., 2014c. Model-Assisted Analysis of Spatial and Temporal Variations in Fruit Temperature and Transpiration Highlighting the Role of Fruit Development. *PLoS ONE* 9, e92532. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092532>
- Nunes, M.C.N., Emond, J.P., Brecht, J.K., Dea, S., Proulx, E., 2007. Quality Curves for Mango Fruit (cv. Tommy Atkins and Palmer) Stored at Chilling and Nonchilling Temperatures. *Journal of Food Quality* 30, 104–120. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2007.00109.x>
- Nyangena, I., Owino, W., Ambuko, J., Imathiu, S., 2019. Effect of selected pretreatments prior to drying on physical quality attributes of dried mango chips. *J Food Sci Technol* 56, 3854–3863. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03857-9>
- Ordóñez-Santos, L.E., Martínez-Girón, J., 2020. Thermal degradation kinetics of carotenoids, vitamin C and provitamin A in tree tomato juice. *International Journal of Food Science & Technology* 55, 201–210. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14263>
- Ornelas-Paz, J. de J., Yahia, E.M., Gardea, A.A., 2008. Changes in external and internal color during postharvest ripening of ‘Manila’ and ‘Ataulfo’ mango fruit and relationship with carotenoid content determined by liquid chromatography–APCI+–time-of-flight mass spectrometry. *Postharvest Biology and Technology* 50, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.05.001>
- 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. *Scientia Horticulturae* 135, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.11.027>
- Pandit, S.S., Chidley, H.G., Kulkarni, R.S., Pujari, K.H., Giri, A.P., Gupta, V.S., 2009. Cultivar relationships in mango based on fruit volatile profiles. *Food Chemistry* 114, 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.107>
- Pandit, S.S., Kulkarni, R.S., Giri, A.P., Köllner, T.G., Degenhardt, J., Gershenzon, J., Gupta, V.S., 2010. Expression profiling of various genes during the fruit development and ripening of mango. *Plant Physiology and Biochemistry* 48, 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.02.012>
- Park, Y.K., Sato, H.H., Almeida, T.D., Moretti, R.H., 1980. Polyphenol oxidase of mango (*Mangifera indica* var. Haden). *Journal of Food Science* 45, 1619–1621. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1980.tb07575.x>
- Patil, Dhairyshil G., Pujari, K.H., Kshirsagar, S.V., 2016. Effect of temperature on ripening behaviour of mango cv. Alphonso. *Advances* 2366.
- Penchaiya, P., Tijskens, L.M.M., Uthairatanakij, A., Srilaong, V., Tansakul, A., Kanlayanarat, S., 2020. Modelling quality and maturity of ‘Namdokmai Sithong’ mango and their variation during storage. *Postharvest Biology and Technology* 159, 111000. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111000>
- Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W., Carle, R., 2005. Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 6, 412–419. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2005.05.004>
- R Core Team., 2019. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. URL: <https://www.R-project.org>.

- Rankins, J., Sathe, S.K., Spicer, M.T., 2008. Solar Drying of Mangoes: Preservation of an Important Source of Vitamin A in French-Speaking West Africa. *Journal of the American Dietetic Association* 108, 986–990. <https://doi.org/10.1016/j.jada.2008.03.013>
- Rathore, . T.M., . S.S., . A.H.S., 2007. Effect of Storage on Physico-Chemical Composition and Sensory Properties of Mango (*Mangifera indica* L.) Variety Dosehari. *Pakistan Journal of Nutrition* 6, 143–148. <https://doi.org/10.3923/pjn.2007.143.148>
- Rey, J.-Y., Diallo, T.M., Vannière, H., Didier, C., Kéita, S., Sangaré, M., 2007. The mango in French-speaking West Africa: varieties and varietal composition of the orchards. *Fruits* 62, 57–73. <https://doi.org/10.1051/fruits:2006051>
- Rivier, M., Méot, J.-M., Ferré, T., Briard, M., 2009b. Le séchage des mangues. Quae, Versailles.
- Robles-Sánchez, R.M., Rojas-Graü, M.A., Odriozola-Serrano, I., González-Aguilar, G.A., Martín-Belloso, O., 2009. Effect of minimal processing on bioactive compounds and antioxidant activity of fresh-cut ‘Kent’ mango (*Mangifera indica* L.). *Postharvest Biology and Technology* 51, 384–390. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.09.003>
- Rodríguez, Ó., Gomes, W., Rodrigues, S., Fernandes, F.A.N., 2017. Effect of acoustically assisted treatments on vitamins, antioxidant activity, organic acids and drying kinetics of pineapple. *Ultrasonics Sonochemistry* 35, 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.09.006>
- Rosalie, R., 2015. Incidence des conditions d’irrigation et de stockage sur la biosynthèse des caroténoïdes et des polyphénols de la mangue 184.
- Rosalie, R., Chillet, M., Joas, J., Léchaudel, M., Payet, B., Emmanuelle, V., Dufossé, L., 2013a. Evaluation of quality parameters and carotenoid content of three cultivars of mango (*Mangifera indica* L.) from Réunion island.
- Rosalie, R., Léchaudel, M., Chillet, M., Dufossé, L., Joas, J., 2019. Could the reliability of classical descriptors of fruit quality be influenced by irrigation and cold storage? The case of mango, a climacteric fruit. *J. Sci. Food Agric.* 99, 3792–3802. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9597>
- Rosalie, R., Léchaudel, M., Dhuique-Mayer, C., Dufossé, L., Joas, J., 2018. Antioxidant and enzymatic responses to oxidative stress induced by cold temperature storage and ripening in mango (*Mangifera indica* L. cv. ‘Cogshall’) in relation to carotenoid content. *Journal of Plant Physiology* 224–225, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.03.011>
- Rosatella, A.A., Simeonov, S.P., Frade, R.F.M., Afonso, C.A.M., 2011. 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) as a building block platform: Biological properties, synthesis and synthetic applications. *Green Chemistry* 13, 754–793.
- Róth, E., Berna, A., Beullens, K., Yarramraju, S., Lammertyn, J., Schenk, A., Nicolaï, B., 2007. Postharvest quality of integrated and organically produced apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 45, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.006>
- Ruiz-López, I.I., García-Alvarado, M.A., 2007. Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity. *Journal of Food Engineering* 79, 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.051>
- Rungpichayapichet, P., Mahayothee, B., Khuwijitjaru, P., Nagle, M., Müller, J., 2015. Non-destructive determination of β -carotene content in mango by near-infrared spectroscopy compared with colorimetric measurements. *Journal of Food Composition and Analysis* 38, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.10.013>

- Rungpichayapichet, P., Nagle, M., Yuwanbun, P., Khuwijtjaru, P., Mahayothee, B., Müller, J., 2017. Prediction mapping of physicochemical properties in mango by hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering* 159, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.006>
- Russo, P., Adiletta, G., Di Matteo, M., Vittorio, F., Corona, O., Cinquanta, L., 2019. Drying Kinetics and Physico-chemical Quality of Mango Slices. *Chemical Engineering Transactions* 75, 109–114. <https://doi.org/10.3303/CET1975019>
- Sarkar, T., Salauddin, M., Choudhury, T., Um, J.-S., Pati, S., Hazra, S.K., Chakraborty, R., 2021. Spatial optimisation of mango leather production and colour estimation through conventional and novel digital image analysis technique. *Spat. Inf. Res.* 29, 439–453. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00377-z>
- Schouten, R.E., Fan, S., Verdonk, J.C., Wang, Y., Kasim, N.F.M., Woltering, E.J., Tijskens, L.M.M., 2018. Mango Firmness Modeling as Affected by Transport and Ethylene Treatments. *Front. Plant Sci.* 9, 1647. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01647>
- Sehrawat, R., Nema, P.K., Kaur, B.P., 2018. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods. *LWT* 92, 548–555. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.012>
- Self, G., Ducamp, M.-N., Thaunay, P., Vayssières, J.-F., 2012. The effects of phytosanitary hot water treatments on West African mangoes infested with *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae). *Fruits* 67, 439–449. <https://doi.org/10.1051/fruits/2012039>
- Shewfelt, R.L., 1999. What is quality? *Postharvest Biology and Technology* 15, 197–200. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00084-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00084-2)
- Siddiq, M., Brecht, J.K., Sidhu, J.S., 2017. *Handbook of Mango Fruit: Production, Postharvest Science, Processing Technology and Nutrition*. Wiley.
- Simmons, S.L., Hofman, P.J., Hetherington, S.E., 1995. The effects of water stress on mango fruit quality, in: *Proceedings of Mango 2000 Marketing Seminar and Production Workshop*. Brisbane, Australia. pp. 191–197.
- Sivakumar, D., Jiang, Y., Yahia, E.M., 2011. Maintaining mango (*Mangifera indica* L.) fruit quality during the export chain. *Food Research International* 44, 1254–1263. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.11.022>
- Sivaranjani, A., Senthilrani, S., Ashok kumar, B., Senthil Murugan, A., 2021. An Overview of Various Computer Vision-based Grading System for Various Agricultural Products. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 0, 1–23. <https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1970631>
- Slaughter, D.C., 2009. *Methods for Management of Ripening in Mango: A Review of Literature*.
- Sogi, D.S., Siddiq, M., Dolan, K.D., 2015. Total phenolics, carotenoids and antioxidant properties of Tommy Atkin mango cubes as affected by drying techniques. *LWT - Food Science and Technology* 62, 564–568. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.015>
- Sohaib Ali Shah, S., Zeb, A., Qureshi, W.S., Malik, A.U., Tiwana, M., Walsh, K., Amin, M., Alasmary, W., Alanazi, E., 2021. Mango maturity classification instead of maturity index estimation: A new approach towards handheld NIR spectroscopy. *Infrared Physics & Technology* 115, 103639. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103639>
- Taïbi, A., Meile, J.-C., Dieudonné, H., Korsten, L., Chillet, M., Remize, F., 2020. New Bacterial Agents to Limit *Colletotrichum gloeosporioides* Development on Mango. *Advances in Microbiology* 10, 691. <https://doi.org/10.4236/aim.2020.1012050>

- Tandon, D.K., Kalra, S.K., 1983. Changes in sugars, starch and amylase activity during development of mango fruit cv Dashehari. *Journal of Horticultural Science* 58, 449–453. <https://doi.org/10.1080/00221589.1983.11515142>
- Temple, N.J., 2000. Antioxidants and disease: More questions than answers. *Nutrition Research* 20, 449–459. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(00\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(00)00138-X)
- Ueda, M., Sasaki, K., Utsunomiya, N., Inaba, K., Shimabayashi, Y., 2000. Changes in Physical and Chemical Properties during Maturation of Mango Fruit (*Mangifera indica* L. 'Irwin') Cultured in a Plastic Greenhouse. *Food Science and Technology Research* 6, 299–305. <https://doi.org/10.3136/fstr.6.299>
- Ullah, R., Khan, S., Bilal, M., Nurjis, F., Saleem, M., 2016. Non-invasive assessment of mango ripening using fluorescence spectroscopy. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 127, 5186–5189. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.03.049>
- Vaikousi, H., Koutsoumanis, K., Biliaderis, C.G., 2008. Kinetic modelling of non-enzymatic browning of apple juice concentrates differing in water activity under isothermal and dynamic heating conditions. *Food Chemistry* 107, 785–796. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.078>
- Valente, M., Dornier, M., Piombo, G., Grotte, M., 2004. Relation entre la fermeté de la mangue fraîche et la teneur en amidon de la pulpe. *Fruits* 59, 399–410. <https://doi.org/10.1051/fruits:2005002>
- Vásquez-Caicedo, A.L., Heller, A., Neidhart, S., Carle, R., 2006. Chromoplast Morphology and β -Carotene Accumulation during Postharvest Ripening of Mango Cv. 'Tommy Atkins'. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54, 5769–5776. <https://doi.org/10.1021/jf060747u>
- Vazquez-Salinas, C., Lakshminarayana, S., 1985. Compositional Changes in Mango Fruit During Ripening at Different Storage Temperatures. *J Food Science* 50, 1646–1648. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb10555.x>
- Wang, J., Jiang, W., Wang, B., Liu, S., Gong, Z., Luo, Y., 2007. Partial Properties of Polyphenol Oxidase in Mango (*mangifera Indica* L. Cv. "Tainong") Pulp. *Journal of Food Biochemistry* 31, 45–55. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2007.00097.x>
- Wanitchang, P., Terdwongworakul, A., Wanitchang, J., Nakawajana, N., 2011. Non-destructive maturity classification of mango based on physical, mechanical and optical properties. *Journal of Food Engineering* 105, 477–484. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.006>
- Wijewickreme, A.N., Kitts, D.D., Durance, T.D., 1997. Reaction Conditions Influence the Elementary Composition and Metal Chelating Affinity of Nondialyzable Model Maillard Reaction Products. *J. Agric. Food Chem.* 45, 4577–4583. <https://doi.org/10.1021/jf970041n>
- Wilson, R.A., Kadam, D.M., Chadha, S., Grewal, M.K., Sharma, M., 2014. Evaluation of Physical and Chemical Properties of Foam-Mat Dried Mango (*Mangifera indica*) Powder during Storage. *Journal of Food Processing and Preservation* 38, 1866–1874. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12158>
- Yahia, E.M., 2017. *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health*, 2 Volumes. John Wiley & Sons.
- Yahia, E.M., 2011. *Mango (Mangifera indica L.)* 76.
- Yao, L., Fan, L., Duan, Z., 2020. Effects of different packaging systems and storage temperatures on the physical and chemical quality of dried mango slices. *LWT* 121, 108981. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108981>

- Yashoda, H.M., Prabha, T.N., Tharanathan, R.N., 2006. Mango ripening: changes in cell wall constituents in relation to textural softening. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86, 713–721. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2404>
- Yitayew, T., Fenta, T., 2021. The Effect of Drying Method on the Texture, Color, Vitamin C and β -Carotene Content of Dried Mango Slices (Cv. Apple and Kent), in: Delele, M.A., Bitew, M.A., Beyene, A.A., Fanta, S.W., Ali, A.N. (Eds.), *Advances of Science and Technology, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Springer International Publishing, Cham, pp. 97–109. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80621-7_7
- Yungyuen, W., Vo, T.T., Uthairatanakij, A., Ma, G., Zhang, L., Tatmala, N., Kaewsuksaeng, S., Jitareerat, P., Kato, M., 2021. Carotenoid Accumulation and the Expression of Carotenoid Metabolic Genes in Mango during Fruit Development and Ripening. *Applied Sciences* 11, 4249. <https://doi.org/10.3390/app11094249>
- Zagade, V.V., Relekar, P.P., 2014. CHEMICAL COMPOSITION, RIPENING BEHAVIOR AND ORAGANOLEPTIC QUALITY OF MANGO cv. ALPHONSO AS INFLUENCED BY THE PERIOD OF MATURITY 6.
- Zhang, H., Huang, J., Li, T., Wu, X., Svanberg, S., Svanberg, K., 2014. Studies of tropical fruit ripening using three different spectroscopic techniques. *Journal of Biomedical Optics* 19, 067001. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.6.067001>
- Zou, K., Teng, J., Huang, L., Dai, X., Wei, B., 2013. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. *LWT - Food Science and Technology* 51, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.005>

Annexes

Annexe 1

Installation d'un équipement de séchage à la Réunion

Contexte

Garantir des conditions similaires de séchage pour plusieurs échantillons de fruits s'est avéré être un besoin très spécifique, auquel seul un équipement conçu spécialement pouvait répondre. Le budget trop réduit n'a pas permis de faire réaliser l'étude, la conception et la réalisation par une société prestataire. Le Cirad UMR QualiSud a alors décidé de le concevoir, réaliser et mettre en route lui-même, en mobilisant fortement ses ressources permanentes internes.

L'étude a été menée en 2017 par Patrice Thaunay, UMR QualiSud sous la supervision de Jean-Michel Méot. Elle a constitué le thème du stage de fin d'études Guillaume Garrigues de l'Ecole des Mines de Nancy. Les permanents Cirad ont poursuivi par la conception, le choix des fournitures et les approvisionnements. La fabrication et le montage ont été réalisés à l'atelier du Cirad UMR QualiSud de Montpellier, majoritairement par JP Fleuriot. L'armoire électrique et le système de contrôle – commande ont aussi été conçus et réalisés en interne. Le séchoir a été réceptionné au Cirad-UMR QUALISUD Réunion, installé et mis en route en Novembre 2017.

J'ai participé activement aux différentes phases depuis la conception jusqu'à la mise en route, et j'en étais l'utilisateur principal.

Cahier des charges, étude et conception

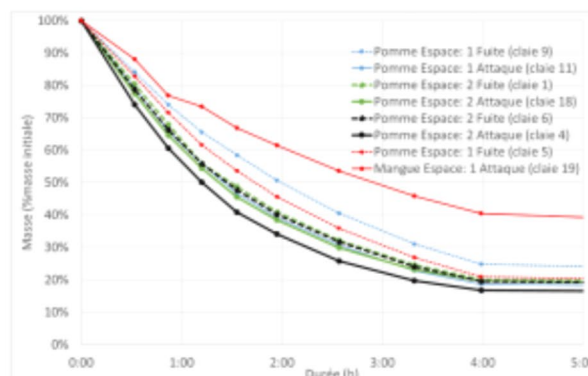
WP2, Tâche 2.2 Mangues séchées

- Approvisionnement et mise en route d'un séchoir apte à répondre aux besoins (1)
 - Cahier des charges
 - 20 échantillons simultanément
 - Conditions « standards » : 60°C, 30%HR, 2 m/s
 - Même T, HR, V_{air} : ±1°C, ±1%HR, ±5% V_{air}
 - Si possible, mesures des cinétiques de pertes en eau des différents échantillons
 - Budget, hors personnel : 12 000 € Interfaces + 12 000 € financé par le Cirad
 - Pas de séchoir adapté sur le marché ; séchoirs pilotes hors budget
 - Choix : Réalisation interne



WP2, Tâche 2.2 Mangues séchées

- Approvisionnement et mise en route d'un séchoir apte à répondre aux besoins (2)
 - Dimensionnement
 - Essais + calculs Air Humide => Rapport volume / quantité de mangues (surface d'échange en début de séchage)



WP2, Tâche 2.2 Mangues sèches

- Approvisionnement et mise en route d'un séchoir apte à répondre aux besoins (2)
 - Dimensionnement
 - Essais + calculs Air Humide => Rapport volume / quantité de mangues (surface d'échange en début de séchage)
 - CFD: équilibrer les flux d'air

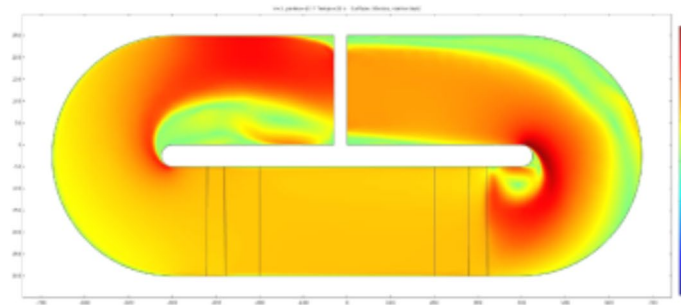
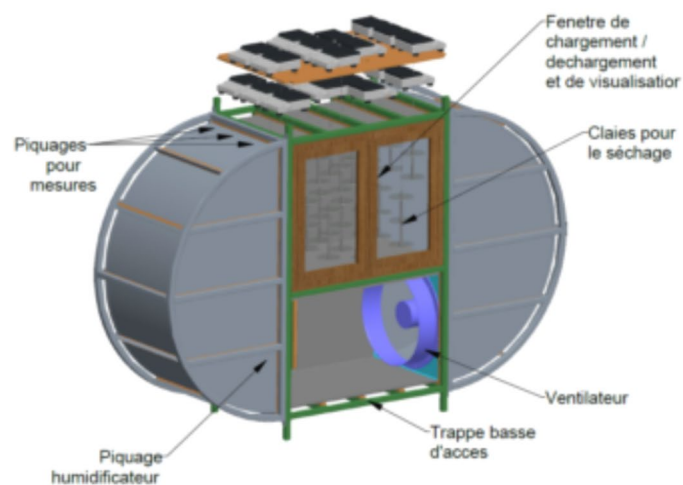


Image 9 : Représentation de la vitesse dans une configuration avec milieu poreux

6

WP2, Tâche 2.2 Mangues sèches



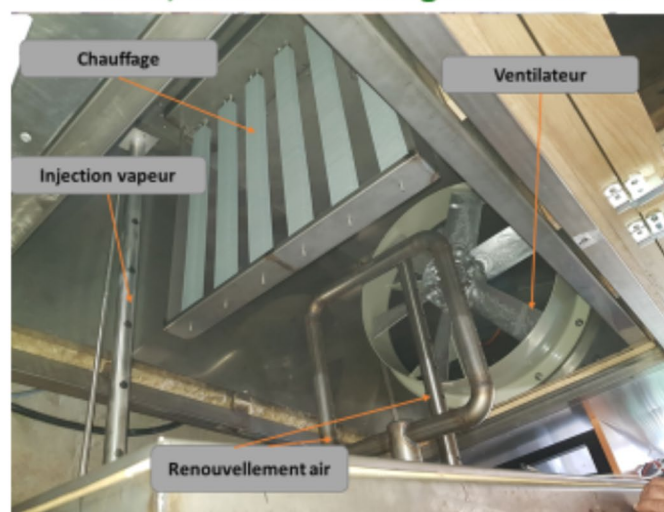
Construction dans l'atelier QualiSud de Montpellier

WP2, Tâche 2.2 Mangues sèches



Constituants du séchoir

WP2, Tâche 2.2 Mangues sèches



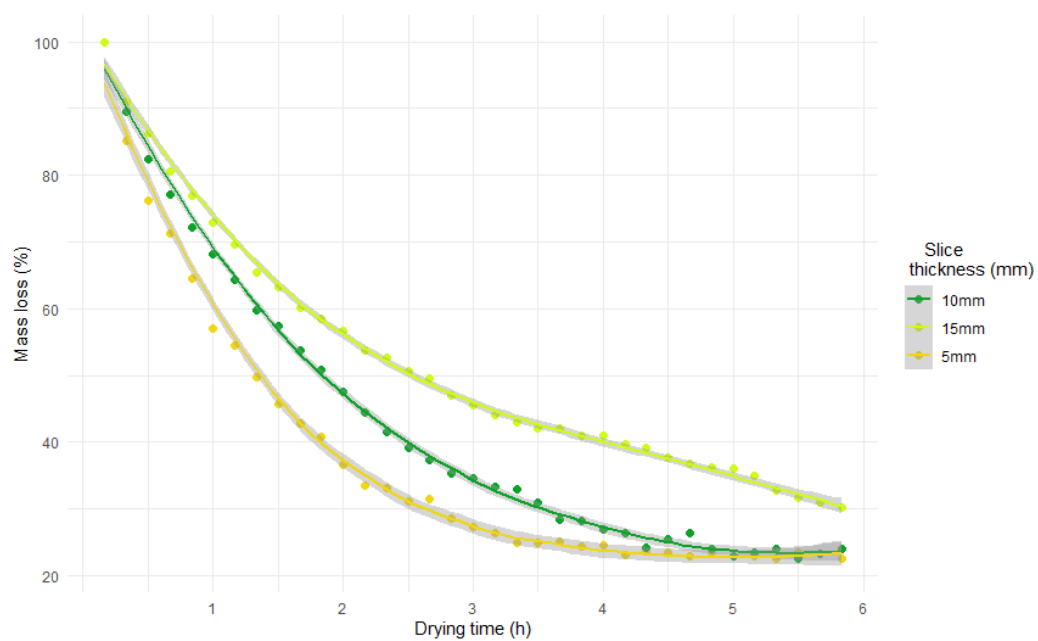
Séchoir installé dans le bâtiment F, Station Cirad *Ligne Paradis*, Saint Pierre



Photo lors de l'essai de séchage du 3 janvier 2018



Essais en mode de pesée automatique : cinétiques de perte en masse des mangues sèches en fonction de l'épaisseur



Annexe 2 : Une a_w optimale, mais des réactions à toutes les a_w

Pour explorer la dépendance de la vitesse de réaction de Maillard à l' a_w , un important travail méthodologique et expérimental a été mené au Cirad Montpellier par JM Meot et C Delpech en parallèle de la présente thèse. J'y ai été associé à distance et lors de mes séjours sur Montpellier. Entre autres choses, des traitements hydrothermiques à 90°C pendant 3h ont été réalisés sur une même pulpe de mangue lyophilisée puis réhydratée à différentes teneurs en eau. Plutôt que des concentrations de composés intermédiaires de réaction, c'est les indices colorimétriques qui ont été suivis car ils représentent bien la perception des consommateurs. Un résultat est représenté à la figure A.1. Du fait de la grande difficulté voire l'impossibilité d'accéder à une valeur exacte de l' a_w à 90°C, une échelle logarithmique a été utilisée pour la teneur en eau. La présentation se rapproche alors d'une avec l' a_w comme abscisses, de nombreux modèles d'isothermes de sorption comportant dans leur structure des exponentielles. Comme on peut le constater, cet artifice rend les résultats bien lisibles. Il a été constaté que la zone optimale de réaction était très réduite, plutôt en forme de « pic » qu'en forme de « cloche ». La vitesse a bien baissé aux teneurs en eau très faibles et très fortes, mais de larges plateaux étaient présents entre le « pic » et les abaissements.

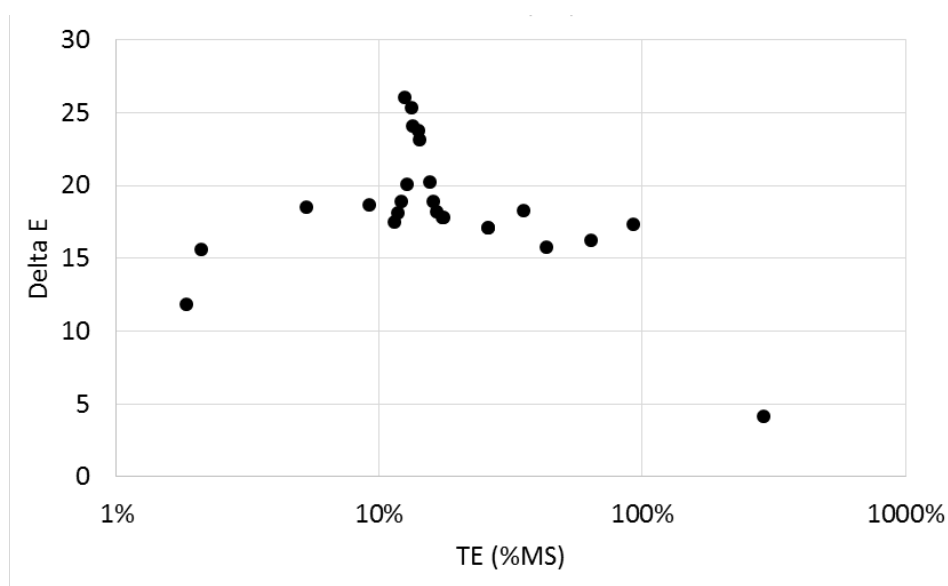


Figure A.1: ΔE^* à différentes teneurs en eau pour un THT de 3h à 90°C

L'utilisation des équations d'isothermes de sorption de pulpe de mangue de (Pott et al., 2005) pour passer de la représentation en teneurs en eau à celle en a_w , conduit à la figure A.2. Elle ne correspond pas du tout à la représentation schématique des réactions de Maillard généralement présentée. Des investigations complémentaires seraient nécessaires afin de d'essayer de mettre en cohérence les résultats. L'oxydation des caroténoïdes pourrait avoir un rôle important voire

dominant dans l'évolution de la couleur des pièces de mangués en deuxième phase de séchage. Alors que nous pensions arriver à un résultat, c'est plus une orientation de recherche.

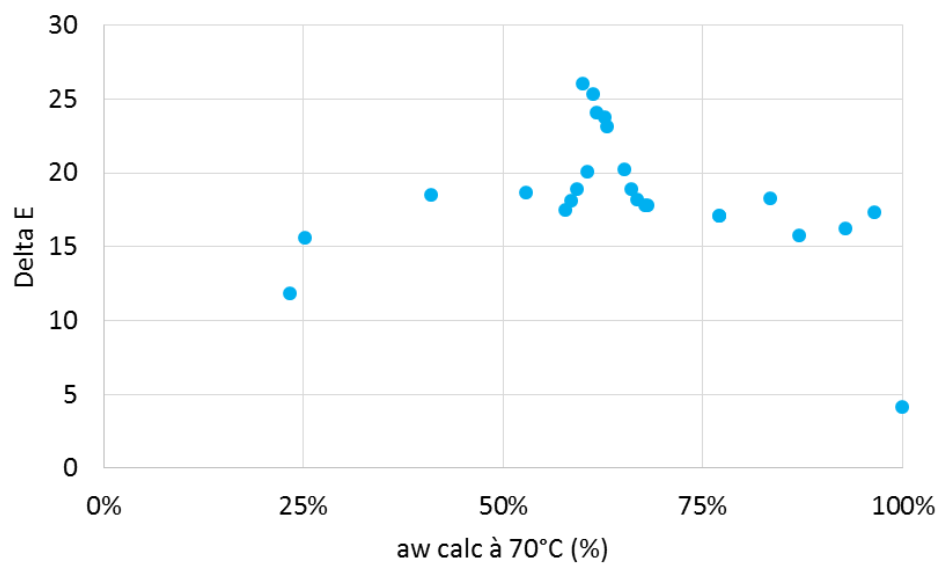


Figure A.2 : ΔE^* à différentes a_w pour un THT de 3h à 90°C

Contribution scientifique

Article accepté dans une revue à comité de lecture :

Diop, A., Méot, J.-M., Léchaudel, M., Chiroleu, F., Ndiaye, N.D., Mertz, C., Cissé, M., Chillet, M., 2021. *Impact of Preharvest and Postharvest on Color Changes during Convective Drying of Mangoes*. Foods, 10 (3), 490. <https://doi.org/10.3390/foods10030490>

Communications orales et posters :

Diop, A., Meot, J.-M., Léchaudel, M., Labaky, P., Dahdouh, L., Grosmaire, L., Ndiaye, N.D., Cisse, M., Chillet, M., 2020. *Quality changes during storage of almost ripe mangoes at 12°C*. Poster présenté dans le cadre du "Third Symposium on Fruit and Vegetable Processing". Avignon, France. 24 Novembre 2020.

Diop, A., Soria, C., Méot, J.-M., Léchaudel, M., Assemet, S., Hoarau, M., Minier, J., Chillet, M., 2020. *La mangue séchée naturelle ou comment limiter les pertes*. Poster présenté dans le cadre du Conseil Scientifique et Technique "Co-conception de système agro-alimentaire de qualités", Saint-Pierre, France. 16 Novembre 2020.

Taïbi, A., **Diop, A.**, Leneuve-Jenvrin, C., Lortal, S., Broussolle, V., Soria, C., Méot, J.-M., Chillet, M., Remize, F., Constancias, F., Meile, J.-C., 2020. *Does processing modify the mango microbiota ?* Communication orale présentée dans le cadre du Symposium "Fruit and Vegetable Processing". Avignon, France. 24 Novembre 2020.

Abstract

Natural dried mangoes are highly appreciated by consumers for their organoleptic characteristics and the lack of added products, sugars or preservatives. However, distributors and retailers complain about the variability of quality, especially for the colour, which is the first purchase criterion. In addition, they turn brown within a few weeks of storage at room temperature, which makes them less attractive. This work provides knowledge on the quality elaboration of natural dried mangoes.

An experimental approach combining different levels of pre- and post-harvest parameters (varietal choice, progress in the production season, maturity stage at harvest, temperature and duration of storage and ripening) allowed the generation of a very high variability in fresh mango quality. These raw materials were dried under the same conditions. Mixed covariance regression models showed that the colour of the dried products is strongly related to that of the fresh mangoes, and the residual differences are statistically poorly explained by the explored pre- and post-harvest parameters. A similar approach was carried out for different drying conditions as sometimes encountered in drying units. This approach allowed to specify the conditions of an optimal drying, different from those which cause deteriorations of the colour, which, in the case of a slow drying onset, depend on pre- and post-harvest factors.

The knowledge acquired on the development of quality criteria for fresh mangoes has made it possible to identify the combinations of pre- and post-harvest factors likely to lead to the best qualities. Furthermore, it was shown that once the right maturity for drying is reached, it is possible to store mangoes at 12 °C for 11 days without altering the organoleptic and technological quality. At the end of this study, the control of the ripening time and the quality obtained at the beginning of drying emerged as the most necessary knowledge to be reinforced. In order to carry out the required researches and then use the results, the capacity to quantify the initial maturity of mangoes must be significantly improved.

The various conclusions of this work confirm the interest of scientific research in creating more extensive perspectives on the continuum between the various actors in the fruit chains in order to offer high-quality processed products.

Keywords : drying ; dried mango ; pre-postharvest ; storage-ripening ; colour ; quality

Résumé

Les mangues sèches naturelles sont très appréciées par les consommateurs pour leurs caractéristiques organoleptiques et l'absence de produit ajouté, sucres ou conservateurs. Cependant, les distributeurs et détaillants déplorent la variabilité de la qualité, surtout pour la couleur qui est le premier critère d'achat. De plus, elles brunissent en quelques semaines de conservation à température ambiante, ce qui les rend moins attractives. Cette thèse apporte des connaissances sur l'élaboration de la qualité des mangues sèches naturelles.

Une approche expérimentale combinant différents niveaux de paramètres pré- et post-récolte (choix variétal, avancement dans la saison de production, stade de maturité à la récolte, température et durée de stockage et maturation) a permis de générer une très grande variabilité de qualité de mangues fraîches. Ces matières premières ont été séchées dans les mêmes conditions. Des modèles mixtes d'analyse de covariance ont montré que la couleur des produits secs est liée fortement à celle des mangues fraîches, et les différences résiduelles sont statistiquement peu expliquées par les paramètres pré- et post-récolte explorés. Une démarche similaire, a été menée pour des conditions de séchage différentes telles que parfois rencontrées en unité de séchage. Cette démarche a permis de préciser les conditions d'un séchage optimal, différentes de celles qui provoquent des détériorations de la couleur, qui, en cas de début de séchage peu intense, dépendent des facteurs pré- et post-récolte.

Les connaissances acquises sur l'élaboration des critères de qualité des mangues fraîches ont permis d'identifier les combinaisons de facteurs pré- et post-récolte susceptibles de conduire aux qualités les meilleures. Par ailleurs, il a été démontré qu'une fois la bonne maturité pour le séchage atteinte, il est possible de conserver les mangues à 12 °C pendant 11 jours sans altération de la qualité organoleptique et technologique. A l'issue de cette recherche, la maîtrise de la durée de maturation et la qualité obtenue en entrée de séchage ressort comme la connaissance la plus nécessaire à renforcer. Pour pouvoir mener les recherches nécessaires puis mettre en œuvre des résultats, les capacités de quantification de la maturité initiale des mangues doivent être très sensiblement améliorées.

Les différentes conclusions de cette thèse confortent l'intérêt de la recherche scientifique, à créer des perspectives plus approfondies sur le continuum entre les différents acteurs des filières fruitières pour proposer des produits transformés de qualité.

Mots clés : séchage ; mangue séchée ; pré-post-récolte ; conservation-maturation ; couleur ; qualité