UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE VÉGÉTALE

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Phytopharmacie et Protection des Végétaux

Évaluation du potentiel de l'analyse d'images pour estimer la maturité des mangues et détecter les piqures de mouches sur les fruits

Présenté et soutenu publiquement le par :

Nicéphore Togbédji AVLESSI

Président : Aboubacry KANE **Maître de conférences, UCAD**

Membres :

Dr Emile FAYE **Chercheur CIRAD**

Dr. Nalla MBAYE **Maître-assistant, UCAD**

Année-académique : 2019-2020

Dédicace

A mes neveux et nièces que je n'ai pas eu la chance de connaître à cause de mon absence pour raison d'études et de voyages. Je vous aime

A cette dame qui n'a pas voulu l'être, mais une fois devenue veuve, a accepté de faire face à toutes sortes de défis pour prendre soin de ses enfants. Merci Maman, je ne te décevrai pas. Je t'aime

A mes frères devenus pères sans s'être mariés et sans avoir eu d'enfants. Je vous aime.

A ce père-là, qui ne voulait qu'une chose, vivre longtemps pour voir ses enfants grandir et les couvrir d'amour. Merci de nous avoir transmis tes qualités. T'as été et tu seras notre repère. Comme promis je ramènerai le titre de 'Docteur' à la maison. Reposes en paix papa.

''Imagination is everything. It is the preview of life's coming attractions''.
-Albert Einstein

''Une image vaut mille mots''.
-Confucius

Remerciements

Je tiens à remercier avec gratitude et mérite :

- le Dr Emile FAYE, d'avoir assuré mon encadrement lors du stage. Ce fut un plaisir de faire du terrain à vos côtés et de pouvoir voir les réalités du monde la recherche. Merci pour la confiance, les remarques pertinentes les encouragements, la patience et tous les enseignements.
- les Dr Jeanne DIATTA et Julien SARRON, pour avoir accepté de co-encadrer mon stage et de s'être rendus disponible pour la réalisation de ce travail;
- le Dr Nalla MBAYE, Répondant à l'Université, pour avoir assuré l'encadrement de ce stage et pour ces conseils dont il ne nous prive pas en cours, son soutien et sa compréhension.
- le Dr Aboubacry KANE, Responsable du master en Phytopharmacie et Protection des Végétaux pour m'avoir accueilli au Sénégal, contribué à la validation de ce stage, sa disponibilité pour toujours me recevoir ;
- Tout le personnel du CDH, et la station de recherche de Sangalkam;
- Mr Kalilou BODIANG qui, avec beaucoup d'enthousiasme m'a appuyé pour les manipulations au laboratoire et de nombreuses fois à pris en charge mes travaux quand j'étais au cours
-Mme Anaïs CHAILLEUX, Paula FERNANDES pour leur appui technique au cours du stage
- Ma mère, mes frères Joan, Igor, Marx et ma sœur Léonie pour le soutien et leur amour
- Mes amis qui pendant mon absence ont été là pour ma famille, Miracle, Olafèmi, Kevin, Léger, Xavier
- Salimatou DIALLO qui a cru en moi, m'a soutenu et m'a couvert de son amour,
-Diane OBA, Haniane AGO, Edvige DJISSONON
- Marina BOSSOUKPE sans qui je n'aurais pas postulé à l'offre de stage
- Roméo KPODJI, qui a sacrifié sommeil, occupations et engagements pour m'accompagner sur le terrain, pour avoir passé des nuits sur la route et au labo.
- Anne Marie ALIA, Dupérier LOKO, Babacar DIOP, Ulrich AGBOHESSOU qui ont également accepté de mettre la main à la pâte.
- Les familles DIALLO, DIOP, qui m'ont offert leur hospitalité toutes ces fois où je finissais mes manipulations à des heures tardives;
- La famille des boursiers DAAD et tous mes camarades de promotion pour tous ces moments d'échanges et de partages de connaissances;
-Tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à la réalisation de ce travail, cette liste n'est point exhaustive.

Ce travail a été réalisé grâce à l'appui technique ou financier des institutions suivantes :

- la Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) d'avoir financé cette formation ; le Centre d'Étude Régional pour l'Amélioration et l'Adaptation à la Sécheresse (CERAAS) de m'avoir accueilli au Sénégal et facilité mon insertion ;
- l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD), la Faculté des Sciences et Techniques (FST) et tout le corps enseignant du master en Phytopharmacie et Protection des Végétaux;
- le Centre pour le Développement de l'Horticulture (CDH) de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA);

Table des matières

Dédicace i
Remerciements ii
Table des matières iv
Liste des tableaux vi
Liste des figures vii
Liste des abréviations et sigles ix
Résumé x
Introduction 1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et problématique 3
1 Le manguier 3
1.1 Origine et distribution 3
1.2 Classification taxonomique et description botanique 3
1.3 Description botanique et exigences écologiques 3
1.4 Appareil végétatif 4
1.5 Appareil reproducteur 4
1.5.1 L'inflorescence 4
1.5.2 Le fruit, la mangue 4
1.6 Propriétés (qualité nutritive) et usages de la mangue 5
1.7 Importance socio-économique de la mangue 5
1.8 La filière mangue au Sénégal 6
1.8.1 Zones et périodes de production 6
1.8.2 Variétés de mangues cultivées au Sénégal 7
1.8.3 Typologie des vergers de mangue dans la région des Niayes 7
1.9 Phénologie du manguier au Sénégal et problématique 8
1.10 Les mouches des fruits : ravageurs majeurs de manguier au Sénégal 10

1.10.1 Cycle de vie des mouches des fruits 10
1.10.2 Relation entre mouche des fruits et maturité des mangues, problématique 11
1.11 Les méthodes de détermination du niveau de maturité des mangues 13
1.11.1 Détermination de la maturité de manière chronologique 13
1.11.2 Détermination visuelle de la maturité 13
1.11.3 Détermination de la maturité basée sur la composition chimique 14
1.11.4 Détermination de la maturité basée sur des méthodes non destructives 14
1.11.5 Les méthodes de détermination du stade de maturité actuellement utilisées au Sénégal 16
1.12 Les méthodes de détection des dégâts de bioagresseurs sur fruits. 16
Chapitre 2 : Matériel et méthodes 18
2.1 Présentation de la zone d'étude et du site de l'étude 18
2.1.1 Zone d'étude 18
2.1.2 Site de l'étude 18
2.2 Matériels 19
2.3 Méthodes 23
2.3.1 Échantillonnage des mangues au verger 23
2.3.2 Acquisition d'images 23
2.3.3 Mesures morphologiques et physicochimiques des mangues au laboratoire 24
2.3.4 Estimation des classes de maturité des mangues 26
2.3.5 Données sur les piqûres des mouches des fruits 27
2.4 Analyse des images de mangues 28
2.4.1 Pré traitement des images 28
2.4.2 La segmentation 29
2.4.3 Extraction des caractéristiques 30
2.5 Estimation des niveaux d'infestation des mangues par les mouches des fruits par analyse d'image 32
2.6 Analyses statistiques 33
Chapitre 3 : Résultats et discussion 34

3.1 Evolution des paramètres morphologiques au cours du temps 34
3.2 Evolution des paramètres physicochimiques au cours du temps 36
3.3 Relation entre les paramètres morphologiques de la mangue 39
3.4 Relation entre les paramètres physicochimiques de la mangue 39
3.5 Relation entre les paramètres morphologiques de la mangue et les paramètres physicochimiques de la mangue 40
3.6 Evolution du niveau de maturité des mangues en fonction du temps 44
3.7 Effet des paramètres morphologiques sur la maturité 45
3.8 Effet des paramètres physicochimiques sur la maturité 47
3.9 Estimation du pH, TA, TSS en fonction des données d'analyse d'images 48
3.9.1 Modélisations pour l'estimation de la teneur en sucre soluble 49
3.9.2 Modélisations pour l'estimation du pH 50
3.9.3 Modélisations pour l'estimation de la teneur en acide (TA) 53
3.10 Détection des piqûres de mouches des fruits 54
3.11 Identification des espèces de mouches des fruits 57
3.12 Relation entre les paramètres physicochimiques de la mangue et la fréquence de piqûres de mouches. 57
Conclusion et perspectives 60
Annexes 60
Références bibliographiques 62

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques du verger et estimation du rendement par imagerie drone en 2018 19
Tableau 2: Tableau recapitulatif des materiels utilisés dans le cadre de cette etude et leur caractéristiques 21
Tableau 3**:** Analyse descriptive des paramètres morphologiques et physicochimiques mesurés au laboratoire. 34
Tableau 4 : Modèles linéaires multiples obtenus pour la variable **log(TSS)** dans les trois situations verger, laboratoire avec la face de la mangue exposée et laboratoire avec la face de la mangue non exposée au soleil. 50
Tableau 5 : Modèles linéaires multiples obtenus pour la variable **pH** dans les trois situations verger, laboratoire avec la face de la mangue exposée et laboratoire avec la face de la mangue non exposée au soleil. 52

Tableau 6 : Modèles linéaires multiples obtenus pour la variable **TA** dans les trois situations verger, laboratoire avec la face de la mangue exposée et laboratoire avec la face de la mangue non exposée au soleil. 54
Tableau 7: Relation entre les paramètres physicochimiques des mangues et la frequence de piqûres des mangues par les mouches. 58

Liste des figures

Figure 1: Architecture du manguier : (a) le modèle de Scarrone (Hallé et al. 1978) et (b) manguier de variété 'Kent' en production 4
Figure 2: (a) Évolution des caractéristiques qualitatives d'un fruit en fonction de sa croissance et de sa maturation, (b), composition d'une mangue mûre (Nordey, 2014). 5
Figure 3 : Evolution de la production de mangue (a) et de l'exportation de mangue (b) dans les principaux pays producteurs de mangue en Afrique de l'ouest francophone (FAOSTAT, 2018) 6
Figure 4: Carte du Sénégal présentant les zones de production de mangues, les périodes de production et les periodes d'exportation.. 7
Figure 5: Variabilité de forme et de couleur en fonction de la variété de mangue dans la région des Niayes au Sénégal. Variétés : (a) 'Kent', (b) 'Keitt', (c) 'Boucodiékhal', (d) 'Divine', (e) 'Sanguine' et (f) 'Papaye'. Le cadre rouge indique la variété d'étude (source photo : J.Sarron). 8
Figure 6**:** Vues sols (image haut) et vues aériennes (image bas) des trois principaux types de vergers à base de manguiers dans les Niayes : vergers extensif sur sol nu, vergers diversifié avec maraîchage et verger intensif d'exportation (source photo : J. Sarron). 8
Figure 7: Cycle phénologique de la variété 'Kent' dans la zone des Niayes au Sénégal. Les rectangles verts foncés indiquent les périodes de croissance végétative, les jaunes celles de la floraison, les verts clairs celles de la fructification et les rouges celles de la récolte. La différence de hauteur entre les rectangles de couleur verte foncée montre la différence de l'intensité de la croissance végétative 9
Figure 8: Piqure de mouches sur mangue (a) , femelle de Bactrocera invadens pondant dans Mangifera indica cv Eldon au Bénin (mangue marquée dans le cadre de l'étude comportement - rythme diurne (b) – verger de Tchatchou – S.D. – Bénin - campagne 2011) (Vayssières) 11
Figure 9: Cycle de vie de Batrocera dorsalis 11
Figure 10: Système de vision par ordinateur 16
Figure 11: Photographie (a) et représentation schématique d'une niaye composée d'une dune (1) et d'un bas-fond (2 et 3). Les conditions pédoclimatiques et la topographie contraignent le type de culture (arbre ou maraîchage) et taille des exploitations (grande ou petite exploitation). 19
Figure 12: Carte d'occupation des sols du verger obtenue par drone (verger diversifié) avec les différentes variétés ('Kent', 'Keitt', 'BDH') de manguier (b). 20
Figure 13 : Image de mangue sur l'arbre (a), larves de mouches des fruits (b) , nymphes (c) et adultes de mouches des fruits (d). 20
Figure 14 Schéma montrant le plan d'échantillonnage de mangue en verger 20
Figure 15: Schema illustrant le processus d'acquisition d'images en verger 24
Figure 16: Schema montrant le processus d'acquisiton des images en laboratoire des faces exterieures de mangues 25
Figure 17: Schema montrant le processus d'acquisiton des images en laboratoire des pulpes de mangues 25

Figure 18: Mesure du poids poids de la mangtue (a), de la grande largeur (b), de la petite largeur (c), de la longueur (d) et du perimètre de la mangue (e), details des mesures morphologiques (f). 25
Figure 19 : Materiels utilisés pour la mesure des paramètres physicochimiques de la mangue. Mangue decoupée (a, b) pour l'extraction du jus (c), mesure de la teneur en sucre soluble avec un refractomètre (d), mesure du pH de la mangue avec un pH-mètre, mesure de l'acidité titrable de la mangue (f). 26
Figure 20: Grille de référence de la classification du niveau de maturité des mangues proposée par l'USDA (en encadré) et charte de couleur constitué à partir des images de mangue provenant de notre échantillonnage. 26
Figure 21 : Mise en incubation des mangues pour extraire les pupes. Incubation de la mangue (a), tamisage (b, c, d) et extraction des pupes (e, f). 27
Figure 22 : Processus de segmentation d'une image pour obtention d'une region d'interet (la mangue). Image avant segmentation (a, e). Conversion de l'image RVB en image 8bits et suppression de l'arrière plan (b, f). Nouvelle image avec un arrière plan uni (c, g). Selection de la mangue pour analyse ultérieure (d, h). 30
Figure 23: Espaces de couleur couramment utilisés : (a) cube de couleur RVB ; (b) cône de couleur HSV ; et (c) système de couleur CIELAB ou L*a*b ; Histogramme de segmentation par seuillage 31
Figure 24 Photo illustrant le processus de comptage des piqûres de mouches sur mangue. Image avant comptage des piqûres (a) et après comptage des piqûres (b). 32
Figure 25: Représentation de l'évolution des paramètres morphologiques de la mangue au cours du temps 36
Figure 26: Representation de l'evolution des paramètres physicochimiques de la mangue au cours du temps 39
Figure 27: Matrice de correlation de Spearman entre les paramètres morphologiques et physicochimiques mesurés sur les mangues 41
Figure 28: Representation de la correlation entre les paramètres morphologiques de la mangue et le teneur en sucre soluble. 42
Figure 29: Representation de la correlation entre les paramètres morphologiques de la mangue et le pH. 43
Figure 30: Representation de la correlation entre les paramètres morphologiques de la mangue et l'acidité titrable. 43
Figure 31**:** Representation de la correlation entre les paramètres physicochimiques 44
Figure 32**:** Representation du niveau de maturité des mangues en fonction du temps 45
Figure 33**:** Representation de l'evolution des paramètres morphologiques en fonction du niveau de maturité des mangues 46
Figure 34**:** Representation de l'evolution des paramètres physicochimiques en fonction du niveau de maturité des mangues 48
Figure 37: Representation de l'evolution du nombre de piqûres de mouches et de la frequence des piqûres en fonction du temps 55

Liste des abréviations et sigles

ANOVA : Analysis of Variance
ASEPEX : Agence Sénégalaise de Promotion des Exportations
CIELAB : L'espace couleur CIELAB, également appelé L*a*b*, est un espace couleur défini par la Commission internationale de l'éclairage.
Cm : Centimètre
FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations
FAOSTAT : Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
g :gramme
Ha : hectare
HSD : Test HSD (Honestly Significant Difference) de Tukey
HSI : Espace de couleur Hue, Saturation and Intensity
HSV : Espace de couleur Hue, Saturation and Value
JPEG : Joint Photographic Experts Group
l :litre
MAER : Ministère de l'Agriculture et de l'Équipement Rural
mm : millimètre
mL :millilitre
meq/L : Milliéquivalents par litre
RAW : Format d'image RAW
RMSE : Erreur quadratique moyenne
RMSEV : Erreur quadratique moyenne de validation
RVB : Espace de couleur Rouge, Vert, Bleu
TA : Teneur en acide
TSS : Sucre Soluble Totaux
USDA : United States Department of Agriculture

Résumé

Le présent travail réalisé au Sénégal, dans la zone des Niayes, a permis d'étudier les possibilités d'utiliser des images RVB de mangues (*Mangifera indica* L.) de variétés 'Kent' afin d'estimer leurs niveaux de maturité et de détecter les piqûres des mouches sur fruits. Les images des mangues ont été collectées en vergers au cours de la saison de production. Les paramètres morphologiques et physicochimiques ont été mesurés sur les mangues. Les indices de couleur et de formes ont été extraits des images par analyses d'images. Les piqûres de mouches des fruits ont été comptées par analyse d'images. Nos résultats montrent des corrélations significatives entre les paramètres physicochimiques (TSS, pH, TA) et les paramètres morphologiques de la mangue (poids, longueur, largeurs, périmètre). Les paramètres morphologiques des mangues sont corrélés positivement au niveau de maturité des mangues. Les paramètres physicochimiques des mangues sont corrélés soit positivement (TSS, pH) ou négativement (TA) aux niveaux de maturité. Des modèles linéaires ont été établis pour estimer les paramètres de qualité des mangues utilisés dans la détermination du niveau de maturité des mangues (TSS, pH, TA) à partir des indices de formes (axe majeur et mineur, le périmètre, la circularité) et de couleur (R, B, RVB, L* et a*) extraits d'images. Les modèles ont permis de faire de bonnes prédictions de TSS et de pH mais une prédiction peu satisfaisante de TA. Il a été observé un effet positif significatif du TSS et du pH sur la fréquence de piqûres des mangues par les mouches des fruits mais un effet significatif négatif de TA. Les mouches émergées après incubation des mangues étaient exclusivement des *Bactrocera dorsalis*. Ces résultats ont démontré le potentiel d'analyse d'images pour l'estimation du niveau de maturité des mangues et la détection des piqûres de mouches des fruits en verger. Toutefois, ces études méritent d'être approfondies afin de prendre en compte dans les modèles développés d'autres paramètres d'estimation du niveau de maturité et de calibrer la reconnaissance des piqûres de mouches sur les images.

Mots clés : *Mangifera indica* L., maturité, analyse d'images, mouches, analyse morphologique, analyse physicochimique, RVB

Abstract

The current work carried out in the Niayes area, Senegal, has allowed to study the possibilities of using RGB images of 'Kent' mangoes in order to estimate mango maturity levels and detect fruit fly bites. Images of mangoes were collected in orchards during the production season. Morphological and physicochemical parameters were measured on the mangoes. Colors and shapes indices were extracted from the images by images analysis. Fruit fly bites were counted by image analysis. Our results showed significant correlations between physico-chemical parameters (TSS, pH, TA) and morphological parameters of mangoes (weight, length, width, perimeter). The morphological parameters of mangoes are positively correlated to their maturity levels. The physicochemical parameters of mangoes are correlated either positively (TSS, pH) or negatively (TA) with mangoes maturity levels. Linear models were established to estimate the mangoes quality parameters used in the determination of mangoes maturity levels (TSS, pH, TA) from shape (major and minor axis, perimeter, circularity) and color (R, B, RGB, L* and a*) indices extracted from images. The models made good predictions of TSS and pH but unsatisfactory prediction of TA. There was a significant positive effect of TSS and pH on the frequency of fruit fly bites on mangoes whereas a significant negative effect of TA was observed. The flies emerged after incubation of mangoes were exclusively *Bactrocera dorsalis*. These results demonstrated the potential of images analysis for estimating the maturity level of mangoes and detecting fruit fly bites in the orchard. However, these studies deserve to be deepened in order to take into account in the developed models other parameters of maturity level estimation and to calibrate the recognition of fruit fly bites on the images.

Keywords: *Mangifera indica* L., maturity, image analysis, fruit flies, morphological analysis, physicochemical analysis, infestation, RGB.

Introduction

L'agriculture au Sénégal, comme dans la plupart des pays de l'Afrique subsaharienne, est l'activité économique principale. Elle emploie plus de 70% de la population Sénégalaise (FAOSTAT, 2013) et contribue à hauteur de 13, 37% au Produit Intérieur Brut (PIB) du pays. Depuis quelques années, le sous-secteur horticole constitue la composante la plus performante et dynamique du secteur agricole (MAER, 2018). En 2018, la production de fruits et légumes au Sénégal était estimée à environ 1 450 000 tonnes avec une production fruitière qui à elle seule était estimée à 244 072 tonnes. La filière mangue est une filière qui contribue efficacement à la lutte contre la pauvreté et l'insécurité alimentaire. En effet, la mangue représentait en 2018 plus de la moitié (53%) de la production fruitière du Sénégal (MAER, 2018). La qualité commerciale des mangues est devenue un facteur clé pour concurrencer les autres exportateurs. Malheureusement la filière mangue, au Sénégal est confrontée à de nombreuses contraintes qui l'empêchent d'assurer la mise sur le marché de produits de meilleure qualité lui permettant de concurrencer efficacement les autres pays exportateurs de mangues. Cependant, la qualité commerciale des mangues d'origine Sénégal est moins compétitive sur le marché d'export du fait de l'hétérogénéité du niveau de maturité des mangues souvent constaté et de l'irrégularité de leur calibre (ASEPEX, 2016). De plus, il est de plus en plus difficile pour la filière de respecter les exigences de qualité sanitaire liées aux mouches des fruits dont *Bactrocera dorsalis*, une espèce très prolifique désormais présente sur le territoire et qui conduit à une perte de production énorme (Ndiaye *et al.*, 2012).

Au vu de cette situation, il est urgent de trouver des solutions visant à augmenter le volume des exportations et à améliorer la qualité des mangues afin de pouvoir rendre plus compétitive la filière. L'estimation avec facilité et précision du niveau de maturité en pré récolte et l'identification précoce des piqûres de mouches sur fruits s'avèrent nécessaires pour orienter les prises de décision par les acteurs de la filière. L'agriculture de précision, et en particulier l'analyse d'images photographiques, offre aujourd'hui de nouvelles perspectives pour recueillir rapidement des informations précises et pertinentes.

Ainsi l'objectif général de ce travail est d'évaluer le potentiel de l'analyse d'images pour l'estimation du niveau de maturité des mangues de manière non destructive et détecter les piqûres de mouches sur fruits. De manière plus spécifique, ce travail vise à :

- évaluer les potentialités de l'analyse de photographies numériques de mangues à différents stades pour évaluer leur maturité à l'échelle du fruit;
- tester la possibilité de détecter les piqûres de mouches des fruits afin de relier le nombre de piqûres avec les taux d'infestation en fonction de la maturité des fruits.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et problématique

1 Le manguier

1.1 Origine et distribution

Le manguier (*Mangifera indica* L.) est l'un des arbres fruitiers les plus anciennement cultivés dans le monde. Son bassin d'origine se trouverait entre le Nord-Est de l'Inde et la Birmanie (Bompard, 2009). Actuellement, le manguier est présent dans toutes les zones tropicales et intertropicales, et dans une moindre mesure, dans le pourtour méditerranéen (Egypte, Espagne, Israël, etc.) (Braz, 2004). Le manguier a été signalé pour la première fois en Afrique de l'Ouest, au Sénégal, en 1824 (Rey *et al.*, 2004).

1.2 Classification taxonomique et description botanique

Le manguier fait partie de la famille des Anacardiaceae qui comprend 73 genres et plus de 1000 variétés différentes, dont la plupart sont issues de pollinisation naturelle (Delroise, 2003). L'espèce *M. indica* est la plus cultivée et consommée du genre *Mangifera* et est adaptée à des climats semi-arides, comme le Sahel. La classification du manguier est la suivante (Kagy, 2010) :

Règne	:	Végétal
Embranchement	:	Spermaphytes
Sous-embranchement	:	Angiospermes
Classe	:	Dicotylédones
Sous-classe	:	Rosidae
Ordre	:	Sapindales
Famille	:	Anacardiaceae
Genre	:	*Mangifera*
Espèce	:	*Mangifera indica* L.

1.3 Description botanique et exigences écologiques

Le manguier (*Mangifera indica* L.) est un arbre à grande cime étalée et arrondie pouvant atteindre 30 m de hauteur ou plus, et peut vivre plusieurs centaines d'années (Arbonnier, 2002; Litz, 2009). Sa morphologie suit un modèle architectural de Scarrone (Figure 1, Halle *et al.*, 1978). Selon les modes de conduite et les variétés, le manguier entre en production entre 3 à 5 ans après la plantation (Litz, 2009). Le manguier est adapté à des régions à pluviosité comprise entre 600 et 1200 mm (Laroussilhe, 1980). Les optimums de températures pour le développement et la croissance des fruits sont compris entre 15°C et 33°C (Laroussilhe, 1980).

Le manguier est moins exigeant du point de vue édaphique et il peut croître sur des sols très variés (Bakry *et al.*, 2002).

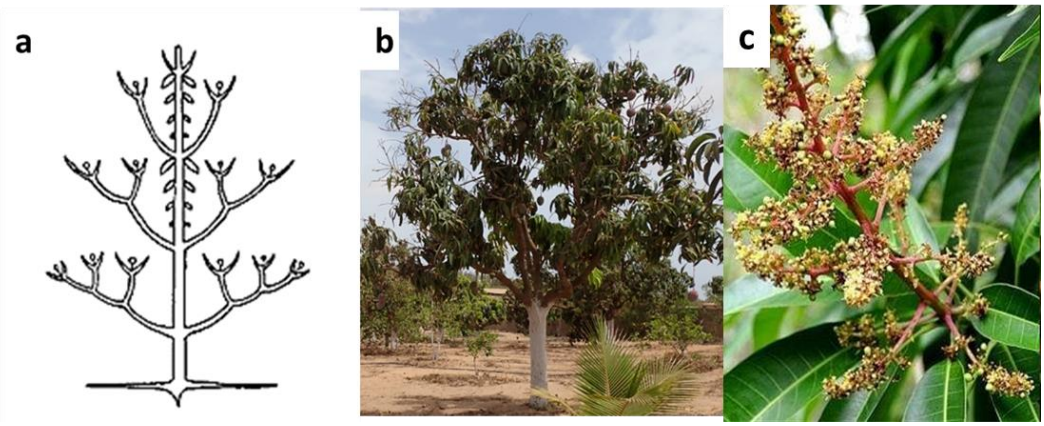


Figure 1: Architecture du manguier : (a) le modèle de Scarrone (Hallé, 1978) et (b) manguier de variété 'Kent' en production, (c) inflorescence d'une mangue

1.4 Appareil végétatif

Le manguier a un système racinaire de type pivotant caractérisé par une ou plusieurs racines pivotantes pouvant atteindre 6 mètres de profondeur assurant l'ancrage et la recherche d'eau en profondeur (Laroussilhe, 1980; Bally, 2006). D'autres racines verticales se forment à partir des racines de surface. Les feuilles sont persistantes, simples, alternées et disposées en spirale. Leur forme et leur taille varient selon les variétés (Litz, 2009).

1.5 Appareil reproducteur

1.5.1 L'inflorescence

Les fleurs du manguier sont regroupées en inflorescence (Dambreville, 2013, Figure 1c). Elle peut compter des milliers de fleurs en fonction de la variété. Selon les climats, la floraison a lieu après un repos végétatif de 2 à 3 mois causé par une période sèche, en climat semi-aride, ou par un excès de pluviosité accompagnée d'un rafraîchissement de l'atmosphère, en climat équatorial.

1.5.2 Le fruit, la mangue

Le fruit, la mangue, est l'organe du manguier qui est étudié dans ce travail de recherche. C'est une drupe plus ou moins aplatie (Figure 2b). Son diamètre, sa forme, sa taille, sa couleur et sa saveur varient suivant la variété (Laroussilhe, 1980; Kagy, 2010). Les couleurs du péricarpe varient du vert au rouge/jaune selon la variété, mais également du stade de maturité et l'exposition au soleil (Nordey, 2014). Le poids de la mangue varie selon les variétés de 50 g

à 2 000 g exceptionnellement (Bally, 2006). C'est un fruit climactérique (caractérisé par un pic d'éthylène pendant le mûrissement), ce qui lui confère un avantage pour l'exportation (Lalel *et al.*, 2003).

1.6 Propriétés (qualité nutritive) et usages de la mangue

Le manguier présente de nombreuses propriétés qui sont utilisées depuis des milliers d'années par l'Homme (Arbonnier, 2002). Dans l'alimentation, ses fruits sont utilisés mûrs ou non mûrs pour leurs propriétés nutritionnelles. Les mangues doivent leur importance nutritionnelle à leur teneur en éléments nutritifs et énergétiques (56 kilocalories pour 100g de fruit) comme les glucides, les lipides, les protéines et des éléments minéraux ainsi que des vitamines (C et A), dont la teneur varie selon l'état de maturité du fruit (Laroussilhe, 1980; Figure 2b). La mangue contient des composés phénoliques qui luttent contre certains cancers et le vieillissement cellulaire. Au Sénégal, la mangue est principalement consommée en frais mais fait également l'objet de transformation en pulpes pasteurisées, confitures, boissons ou mangues séchées (ASEPEX, 2012).

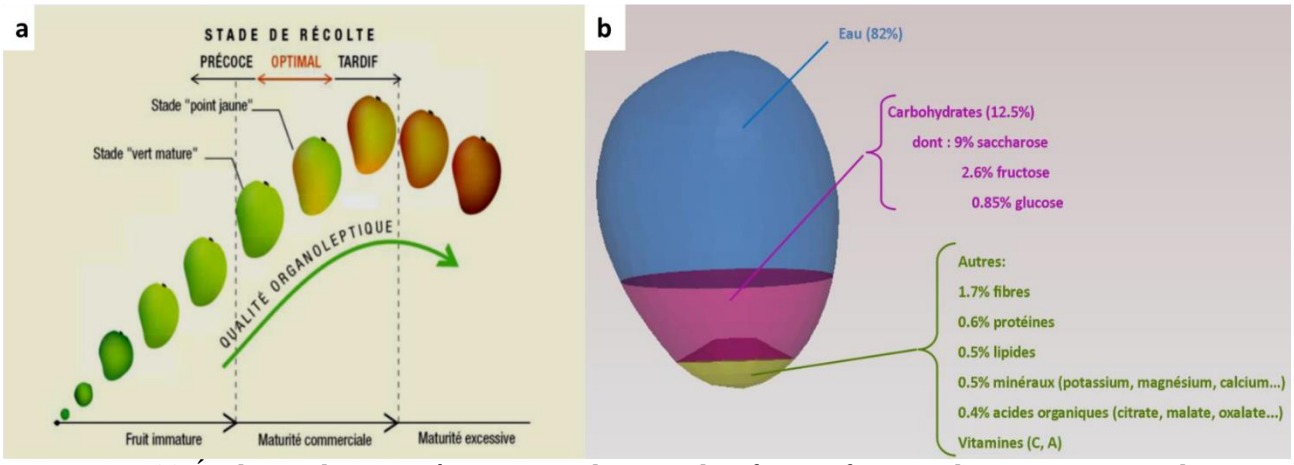


Figure 2: (a) Évolution des caractéristiques qualitatives d'un fruit en fonction de sa croissance et de sa maturation, (b), composition d'une mangue mûre (Nordey, 2014).

1.7 Importance socio-économique de la mangue

La mangue est la cinquième production fruitière mondiale après la banane, la pomme, les raisins, les agrumes (FAOSTAT, 2018). En Afrique de l'Ouest, la production annuelle représente environ 2,5 millions de tonnes sur une superficie de 514 949 ha, soit 4,6 % de la production mondiale. Le Sénégal quant à lui se positionne comme le 5ème producteur en Afrique de l'Ouest derrière le Nigéria, le Mali, le Niger et la Guinée avec une production nationale estimée à 133 600 tonnes en 2018 sur une superficie de 20 100 ha (Figure 3a). L'année 2000 a

marqué le début d'une croissance soutenue des exportations de mangues du Sénégal vers l'Europe (Allemagne, Pays-Bas , France et Belgique), les pays de la sous-région (Mauritanie, Ghana, Maroc) et le Moyen-Orient(ASEPEX, 2016; Figure 3b). En 2017, le Sénégal était la 2ème plus importante origine d'exportation de mangues Ouest-africaine après la Côte d'Ivoire avec un volume de 16 225 tonnes de mangues exportées toutes destinations confondues soit 12% du volume total produit (Diatta, 2018; Figure 3b) .

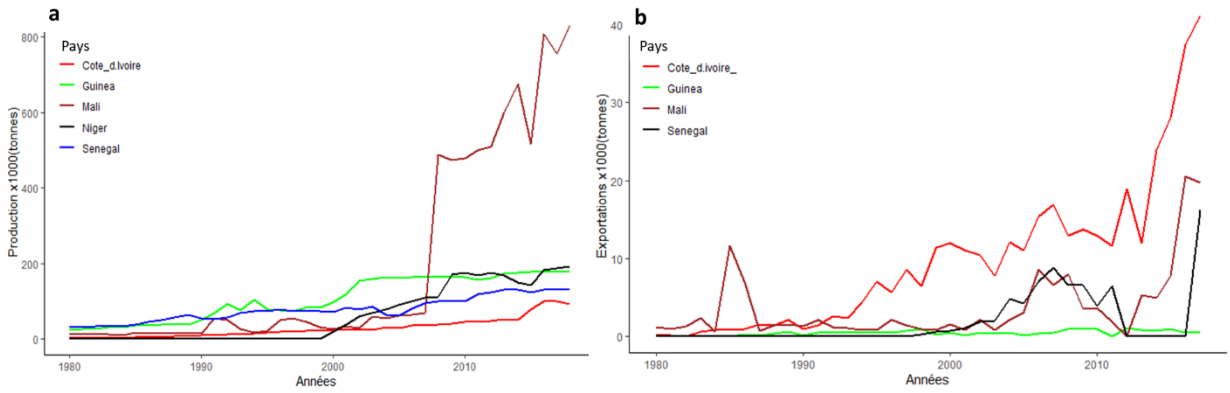


Figure 3 : Evolution de la production de mangue (a) et de l'exportation de mangue (b) dans les principaux pays producteurs de mangue en Afrique de l'ouest francophone (FAOSTAT, 2018)

1.8 La filière mangue au Sénégal

1.8.1 Zones et périodes de production

La principale zone de production de mangues export du Sénégal se situe dans la zone des Niayes, du lac Rose jusqu'à Mboro en passant par la zone de Sébikotane (grands vergers industriels). En descendant vers le sud, la petite Côte (Mbour), le Sine Saloum et la Casamance sont également des régions productrices de mangues (Figure 4). Les superficies couvertes par les vergers de mangue au Sénégal, sont estimées à 25 000 ha (ASEPEX, 2016). Rey et Dia (2010) ont estimé que la Casamance représentait 57% de la production suivie par la région des Niayes (37%). Cependant l'essentiel de l'exportation (70 à 80%) est assurée par la région des Niayes qui possède l'avantage d'être située à proximité des axes routiers et du port de Dakar (Ternoy *et al.*, 2006; Sarron *et al.*, 2019). Le pays produit des mangues sur 6 mois (d'avril à septembre), avec une fenêtre d'exportation de 3 à 4 mois, l'essentiel des exportations étant concentré sur les mois de juin et août contrairement au Mali et en Côte d'Ivoire où la production de mangues d'exportation s'étale sur 4 mois (de mars à juin). Dans la région des Niayes, la production s'étale sur le créneau juillet-août-septembre, ce qui permet au Sénégal de prendre le relais de la production ouest africaine sur les marchés régionaux et internationaux. En Casamance, dans la zone du Sine Saloum et sur la Petite Côte, la production est plus précoce (mai-juin-juillet).

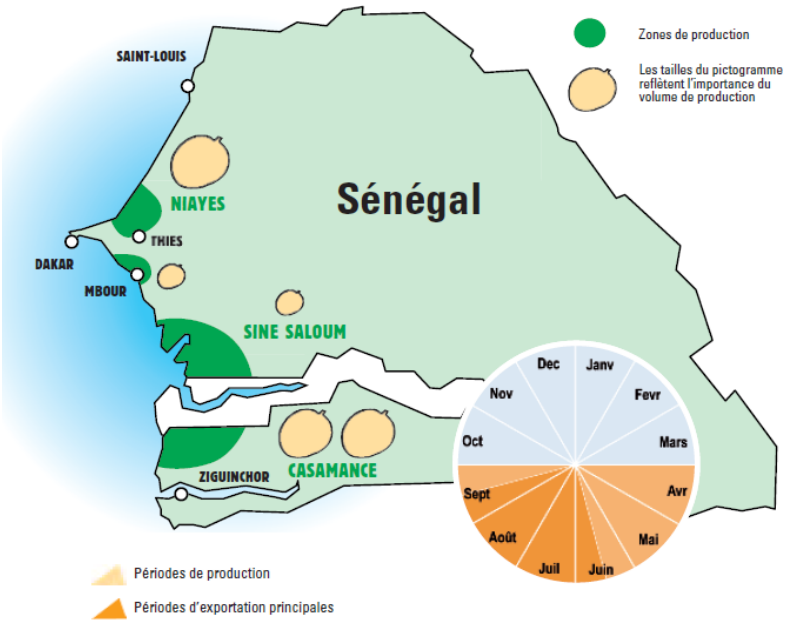


Figure 4: Carte du Sénégal présentant les zones de production de mangues, les périodes de production et les périodes d'exportation. (ASEPEX, 2016)

1.8.2 Variétés de mangues cultivées au Sénégal

Au Sénégal, il existe de nombreuses variétés de mangues (Rey *et al.*, 2006). Les variétés les plus cultivées et exploitées aujourd'hui sont la 'Kent' et la 'Keitt'. On retrouve également dans les vergers sénégalais et surtout au sud du pays bien d'autres variétés intéressantes pour l'‟exportation ('Tommy Atkins', 'Zill', 'Palmer') et plusieurs variétés de mangue locales ('diorou', 'sierra leone', 'papaye', 'bouko diékhal', 'balanta','mbeug mbeug'…) (EUROPAFRIQUE, 2013 ; Figure 5). La 'Kent' représente à elle seule plus de 70 % des mangues exportées. C'est une variété qui donne un gros fruit de coloration externe rouge pourpre avec une chair orangée fondante et juteuse, sans fibre. Sa qualité gustative est excellente et elle résiste bien au transport maritime (Ternoy *et al.*, 2006). C'est une variété extrêmement privilégiée sur le marché export d'où l' intérêt de sa considération dans présente étude (Rey *et al.*, 2006).

1.8.3 Typologie des vergers de mangue dans la région des Niayes

Grechi *et al* (2013) ont caractérisé les systèmes de culture de manguiers rencontrés dans la zone des Niayes au Sénégal ce qui a permis d'avoir une meilleure typologie des vergers à base de manguiers. Quatre types de systèmes de culture ont ainsi été identifiés selon les pratiques appliquées aux manguiers (tailles, niveaux d'irrigation, fertilisation, etc.) et la structure du verger (densité de plantation, diversité cultivée, volume de biomasse). Dans le cadre de notre étude, trois types de vergers sont considérés (Figure 6) les vergers 'extensifs', les vergers 'diversifiés et les vergers 'intensifs'

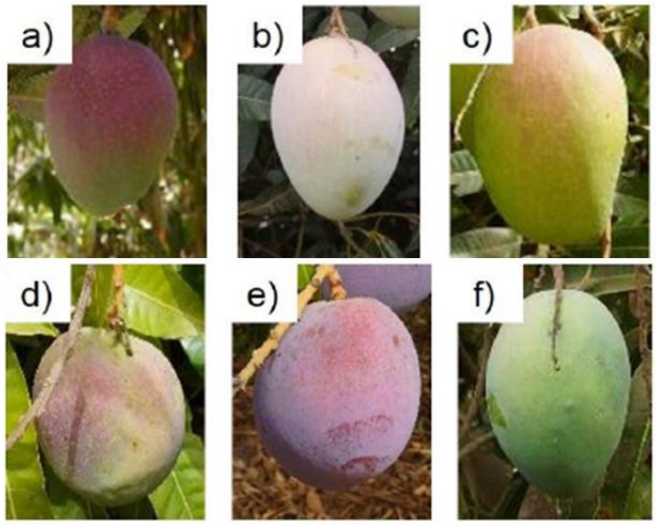


Figure 5: Variabilité de forme et de couleur en fonction de la variété de mangue dans la région des Niayes au Sénégal. Variétés : (a) 'Kent', (b) 'Keitt', (c) 'Boucodiékhal', (d) 'Divine', (e) 'Sanguine' et (f) 'Papaye'. Le cadre rouge indique la variété d'études (source photo : J.Sarron).

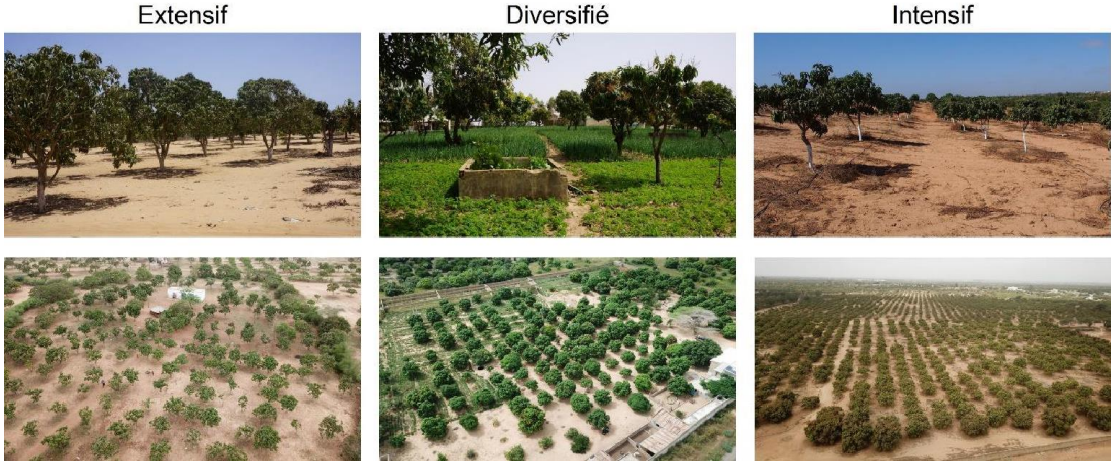


Figure 6**:** Vues sols (image haut) et vues aériennes (image bas) des trois principaux types de vergers à base de manguiers dans les Niayes : vergers extensif sur sol nu, vergers diversifié avec maraîchage et verger intensif d'exportation (source photo : J. Sarron).

1.9 Phénologie du manguier au Sénégal et problématique

Les événements périodiques de la phénologie du manguier sont la croissance végétative, le repos végétatif, la floraison et la fructification (Normand et Vincenot, 2009). Le cycle phénologique varie selon les variétés et les zones écologiques. La Figure 7 décrit le cycle phénologique pour le manguier de variété 'Kent' dans la zone des Niayes.

Dans cette zone, deux périodes de croissance végétative sont généralement observées : une première de février à début avril qui se déroule en même temps que la floraison du cycle précédent et une seconde d'août à octobre pendant la saison chaude et humide (Diatta, 2018). Le repos végétatif est quant à lui observé sur la période de novembre à fin décembre. Enfin, la floraison des manguiers 'Kent' commence fin décembre et peut s'étaler jusqu'en avril. La

récolte dans la zone des Niayes, a lieu de mi-juin à août bien que la détermination du stade de récolte soit encore une question préoccupante (Diatta, 2018).

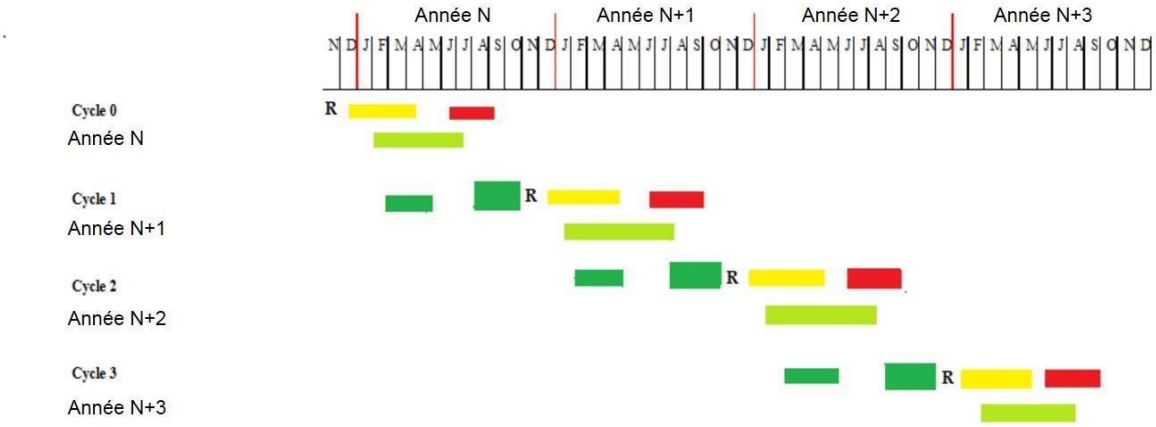


Figure 7: Cycle phénologique de la variété 'Kent' dans la zone des Niayes au Sénégal. Les rectangles verts foncés indiquent les périodes de croissance végétative, les jaunes celles de la floraison, les verts clairs celles de la fructification et les rouges celles de la récolte. La différence de hauteur entre les rectangles de couleur verte foncée montre la différence de l'intensité de la croissance végétative (source: Diatta, 2018).

Au cours de la croissance de la mangue, de nombreux changements aussi bien morphologiques que physicochimiques s'opèrent. Les changements morphologiques se traduisent par des variations de la taille, du poids et de la forme de la mangue (Subramanyam *et al.*, 1975). Ils s'accompagnent de changements visuels de la couleur du péricarpe et de la chair (Subramanyam *et al.*, 1975; Nordey, 2014). En dehors des changements morphologiques, différents changements physicochimiques interviennent de façon complexe, progressive ou concomitante (Simão *et al.*, 2008) . Selon Simão *et al (*2008), l'amidon constituerait la source principale de carbone pour la fabrication des sucres solubles. L'acidité de la mangue augmente progressivement dans la première phase de développement et diminue ensuite lentement jusqu'à la récolte (Subramanyam *et al.*, 1975). Ces changements qui s'opèrent sont généralement considérés comme des indicateurs du niveau de maturité des mangues. Ils sont pris en compte lors de la récolte pour des raisons de réglementation commerciale, de stratégie de commercialisation (critère de choix du consommateur) et pour des raisons de bonne planification de la récolte qui passe par le recrutement de la main d'œuvre (Reid, 1992; Ayisha et Niyas, 2017).

La mangue étant un fruit climatérique, sa maturation commence sur l'arbre et dépend de la respiration qui varie en fonction de sa vitesse de croissance (Léchaudel *et al.*, 2005)et de la température (Ravindra et Goswami, 2008). Ainsi, sur pied, les fruits arrivent à maturité de manière variable et il est difficile de s'appuyer sur des paramètres visuels (changements de couleurs ou de taille) pour déterminer le niveau de maturité à la récolte. Le fruit doit atteindre

un niveau de maturité physiologique au moment de la récolte afin de garantir sa qualité optimale et sa durée de vie post récolte d'où la nécessité de déterminer le niveau de maturité des mangues. C'est dans cet ordre d'idées que le premier objectif de cette étude est la détermination du stade de maturité des mangues de manière non destructive en se servant d'images photographiques RVB.

1.10 Les mouches des fruits : ravageurs majeurs de manguier au Sénégal

Au Sénégal, les pertes liées aux *Tephritidae* sur la mangue varient entre 30% dans la zone des Niayes à 60% en Casamance (Ternoy *et al.*, 2006; Ndiaye, 2009). Dans la zone des Niayes (Sangalkam, Notto, Keur Séga), de Thiès (Peycouk sérère et Sindia) et de Sindia en période de production de mangue, il a été noté une nette prédominance de *B.invadens*, une espèce originaire de Sri Lanka nouvellement introduite, sur les Tephritidae endémiques composées de Cératites (*Ceratitis cosyra, C. sylvestri*i, *C. capitata* et *C. fasciventris*) (Drew *et al.*, 2005; Vayssières *et al.*, 2007; Ndiaye *et al.*, 2008). Cette espèce a été décrite comme étant un organisme de quarantaine dévastateur par le conseil phytosanitaire de l'Union Africaine (French, 2005; Badii *et al.*, 2015).

La filière mangue au Sénégal est particulièrement touchée par cette espèce à cause du pic de production des mangues qui coïncident avec le pic des populations de la mouche (Ndoye, 2011). La coïncidence phénologique des stades pré-maturité et maturité des mangues (facteurs biotiques) avec les pluies (facteurs abiotiques) entraîne une explosion démographique des populations de *B. invadens* (Vayssières *et al.*, 2009). En Casamance, les pertes causées par cette mouche peuvent atteindre 80% de la production et 30-50% dans les Niayes (Vayssières *et al.*, 2012) .

1.10.1 Cycle de vie des mouches des fruits

Le cycle de vie de la plupart des espèces de *Tephritidae* est similaire (Figure 9). Les mouches pondent leurs œufs sous l'épiderme des mangues (Figure 8). Les larves issues de ces œufs se nourrissent de la pulpe du fruit et y creusent des galeries.

Avant la fin de leur cycle larvaire, elles s'éjectent et tombent au sol où elles s'enfouissent et se transforment en pupes. Ultérieurement, des adultes ailés émergeront de ces pupes. Au cours d'une saison de fructification, plusieurs générations se succèdent, provoquant une multiplication exponentielle de la population (Vannière *et al.*, 2013). Les facteurs environnementaux sont fortement impliqués dans le processus d'invasion des mouches des fruits. C'est l'exemple de *B. invadens* dont les niveaux d'infestation augmentent après les

premières pluies significatives (Vayssières *et al.*, 2005). La lutte contre les mouches des fruits est complexe compte tenu de leur répartition, de leur propagation rapide et du coût engendré (INFOCOMM, 2016).

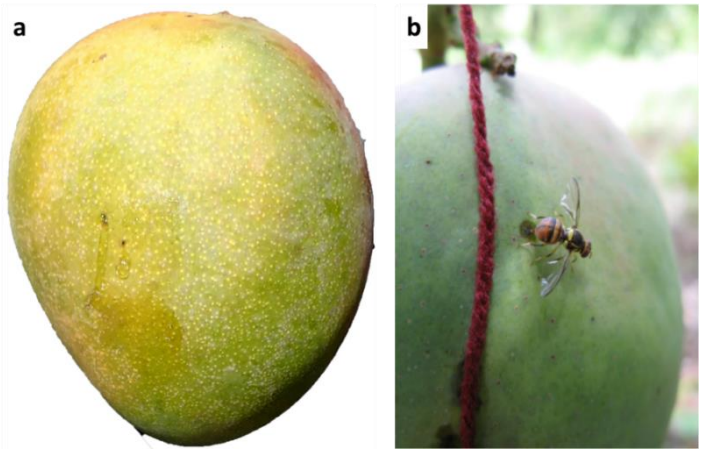


Figure 8: Piqure de mouches sur mangue (a), femelle de *Bactrocera invadens* pondant dans *Mangifera indica cv Eldon* au Bénin (Vayssières, 2012).

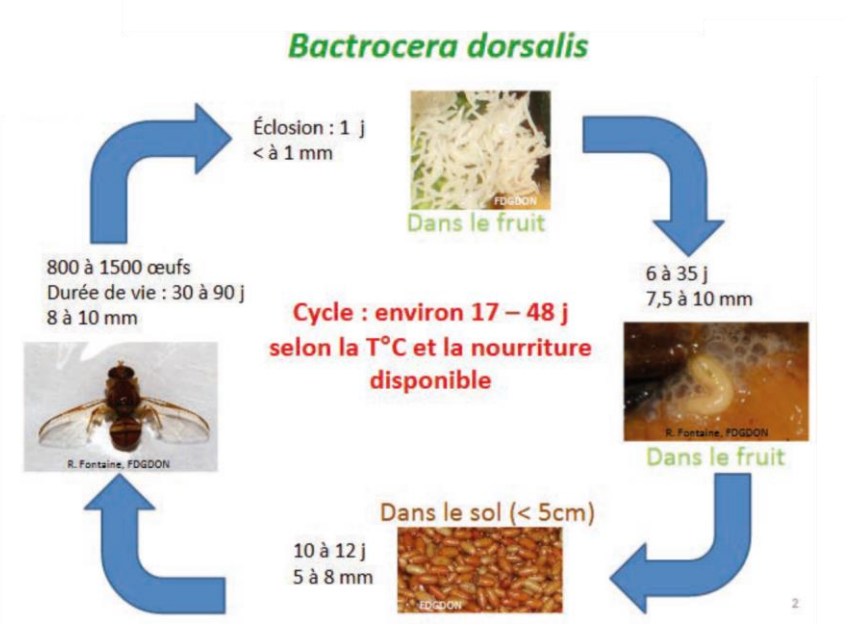


Figure 9 : Cycle de vie de *Bactrocera dorsalis* (TERRE RÉUNION, 2019)

1.10.2 Relation entre mouche des fruits et maturité des mangues, problématique

Dans la littérature, le niveau de maturité influencerait les niveaux d'infestations des mangues par les mouches des fruits. En effet, le niveau de maturité du fruit hôte influence les caractéristiques physiques et chimiques du fruit telles que la couleur, la fermeté des tissus, l'arôme, la proportion d'amidon par rapport aux sucres libres et les quantités d'autres composés organiques (Bidwell, 1979; Lalel *et al.*, 2003; Yashoda *et al.*, 2007). Ces changements observés

pendant la maturation influencent le comportement de ponte des mouches des fruits (Messina et Jones, 1990; Rattanapun *et al.*, 2009). Comme pour de nombreux insectes herbivores pour lesquels le choix du site de ponte dépend au moins partiellement de la qualité de la plante (Wilson, 1988; DiTommaso et Losey, 2003), les mouches des fruits adultes sont connues pour décider du choix du fruit à pondre en fonction de l'adéquation du fruit aux performances de leur progéniture (Fitt, 1981; Fontellas-Brandalha et Zucoloto, 2004; Rattanapun *et al.*, 2009). Selon (Laroussilhe, 1980), les attaques des mouches par les fruits se produisent depuis le grossissement du fruit jusqu'à la maturation.

La prise en compte de la relation entre le niveau de maturité des mangues et la fréquence de piqûre de mouches pourrait servir à estimer les risques d'infestation des mangues par les mouches des fruits. Cependant les estimations des niveaux d'infestation ne sont pas faciles à faire et se font souvent tardivement lorsque les infestations dans les vergers sont élevées. L'estimation des niveaux d'infestation des mouches à partir des images de mangues de différents niveaux de maturité permettrait au producteur de décider non seulement de la période adéquate pour appliquer un traitement s'il y a lieu ou du changement de la date de récolte comme stratégie d'évitement. Une mise au point de nouveaux outils d'identification précoce des piqûres de mouches des fruits et de quantification de leur dégât en verger s'avère donc indispensable. Pour l'exportateur, un tel outil servirait à avoir une plus grande assurance de la qualité des mangues et un gain de temps énorme lors du contrôle de la qualité des mangues. Ainsi, le second objectif du présent travail est de pouvoir estimer le taux d'infestation des mangues par les mouches des fruits à partir d'analyse d'images.

Dans la littérature, de nombreuses méthodes et outils d'estimation du niveau de maturité des mangues et de détection des dégâts sur fruits ont été rapportés. Le présent chapitre est un récapitulatif de ces différentes méthodes et/ou outils utilisables pour estimer le niveau de maturité des mangues à la récolte et détecter les dégâts sur les fruits. Il commence par une présentation de ces méthodes de façon générale et met ensuite un focus sur ceux utilisés au Sénégal.

1.11 Les méthodes de détermination du niveau de maturité des mangues

Plusieurs paramètres subjectifs ou non ont été proposés pour déterminer le stade de maturité des fruits sur la base de leur aspect extérieur ou bien de leurs constituants chimiques au moment de la récolte (Subramanyam *et al.*, 1975).

1.11.1 Détermination de la maturité de manière chronologique

La maturité peut être définie chronologiquement par exemple, en nombre de jours après la pleine floraison ou par le calcul des unités de chaleur (en degré-jour) accumulées pendant la période de croissance (Reid, 1992; Subedi *et al.*, 2007; Walsh et Wang, 2018). L'utilisation du nombre de degré-jours pour prédire la récolte est difficile car il varie en fonction de la variété, du climat, de l'altitude, des caractéristiques du sol et des pratiques culturales (Normand et Vincenot, 2009). A l'heure actuelle, les connaissances sur le nombre de degré-jours nécessaire pour atteindre la maturité du fruit sont limitées à certains contextes.

1.11.2 Détermination visuelle de la maturité

Un large éventail de caractéristiques physiques sont utilisées par les producteurs pour évaluer la maturité de la mangue (Reid, 1992). Il s'agit de la forme du fruit, la taille du fruit, la gravité spécifique (Slaughter, 2009), la formation de la couche d'abscission, la fermeté du fruit ou de la chair, l'apparition de petits points noirs, la couleur de la chair et de la peau. (Reid, 1992; Ayisha et Niyas, 2017) Cependant, ces critères visuels ne sont pas des indicateurs fiables du stade de maturité de la mangue (Nordey, 2014). Beaucoup de ces critères restent empiriques et sont principalement utilisés pour déterminer la récoltabilité du fruit, avec une équivalence approximative du stade de maturité réel (ou état physiologique). Leur usage comme indicateurs de maturité ne peut pas être systématique et demande une expérience acquise sur le terrain (Normand et Vincenot, 2009; Lechaudel *et al.*, 2010).

1.11.3 Détermination de la maturité basée sur la composition chimique

Les changements chimiques utilisés pour l'estimation de la maturité comprennent la teneur en solides solubles, la teneur en amidon, l'acidité titrable, la teneur en composés phénoliques, les caroténoïdes (Lechaudel *et al.*, 2010), la teneur en matières solides totales (matière sèche) (Slaughter, 2009), l'odeur (Zakaria *et al.*, 2012) et la concentration interne d'éthylène (CEI) (Geethapriya et Praveena, 2017). Mais ces indicateurs sont destructeurs car ils exigent que l'échantillon interne de la chair du fruit soit extrait et analysé (Fadzli Abd Shaib *et al.*, 2017), et ils ne peuvent être employés que sur un nombre réduit de fruits (Lechaudel *et al.*, 2010).

Dans leur enquête sur l'amélioration de la qualité et des performances du fruit de la mangue, Kouno *et al (*1993)ont conclu que les recherches futures devraient envisager des indices de récolte faciles à appliquer et des méthodes non destructives de contrôle de la maturité des fruits qui pourraient être incorporés dans un système de classement automatisé" (Abu, 2010).Selon Reid (1992), un tel indice doit de préférence être objectif (une mesure) plutôt que subjectif (une évaluation) et si possible non destructif.

1.11.4 Détermination de la maturité basée sur des méthodes non destructives

De nombreuses techniques non destructrices d'évaluation du niveau de maturité des fruits en général et de la mangue en particulier ont été rapportées dans la littérature. Ces techniques comprennent la spectroscopie (Saranwong *et al.*, 2004; Subedi *et al.*, 2007; Jha *et al.*, 2012; Nordey *et al.*, 2017), la vision par ordinateur à partir d'images RVB (Rouge-Vert-Bleu, spectre visible), multispectrales, hyperspectrales (Fadzli Abd Shaib *et al.*, 2017) , le nez électronique, la gravité spécifique (Kapse et Katrodia, 1997), les ultrasons, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) (Qing *et al.*, 2007) ou encore l'impulsion de résonance acoustique (Ito et Sugiyama, 2002; Valente et Ferrandis, 2003).

Jha *et al.* (2007) ont proposé une technique utilisant un colorimètre portatif pour prédire la maturité à partir de courbes d'étalonnage entre le niveau de maturité et les valeurs de couleur de la peau. Nordey *et al.* (2015) ont proposé une méthodologie basée sur la spectroscopie pour estimer, à partir des spectres de la pelure de la mangue, la couleur de la peau du fruit ainsi qu'un indicateur du stade de maturité du fruit, la teneur en chlorophylle de la pelure. Les travaux de Assoi *et al.* (2019) rapportent qu'il est possible de mesurer grâce à la télédétection les paramètres chimiques de la mangue tels que le taux de sucre, le pH et la teneur en eau. La

spectroscopie proche infrarouge (NIR) a été évaluée comme une méthode non destructive pour prédire la maturité et la qualité alimentaire de la mangue "Carabao" (Polinar *et al.*, 2019).

Plus récemment, (Wendel et al. 2018) ont utilisé une caméra hyperspectrale pour prédire la maturité des fruits individuellement pour des centaines d'arbres dans un bloc de vergers de mangues. Elsayed, (2016) a testé les performances de la détection hyperspectrale par réflectance passive et de l'analyse des images numériques pour l'évaluation de la relation entre les différents degrés de maturité des mangues avec les paramètres biochimiques. Cependant, le coût de ces technologies, la difficulté de les déployer dans les vergers et la variabilité des cultivars ne permettent pas de les généraliser et peu d'applications commerciales sont connues (Kagy, 2010).

Un système basé sur la vision par ordinateur peut également être considéré comme l'une des techniques non destructrices qui pourraient être explorées pour déterminer l'état interne des fruits (Figure 10). Cette technique implique l'étude des conditions internes des fruits sur la base des caractéristiques externes du fruit qui comprennent la texture, la taille, la forme et la couleur de la peau. Plusieurs méthodes basées sur la vision par ordinateur ont été développées pour déterminer l'état de maturité des différents fruits. Des études ont été menées pour caractériser le niveau de maturité de la mangue. Nandi *et al.* (2012) ont utilisé un système basé sur la vision artificielle pour prédire le niveau de maturité des mangues à partir d'image RVB collectée à l'aide d'une caméra. Une méthode de traitement numérique des images a été proposée par Fmim *et al.* (2017) pour classer les mangues en six stades de maturité en utilisant les caractéristiques de couleur RVB et HSI et de taille extraites des images des mangues.

Les travaux de Nandi *et al.* (2012) montrent que les performances des systèmes de vision artificielle sont plus proches de celles des experts manuels, qui jugent le niveau de maturité des mangues non seulement en fonction de la couleur de la peau, mais aussi de la fermeté et de l'odeur. En résumé, les méthodes non destructives d'évaluation de la maturité présentent de nombreux atouts en comparaison aux méthodes destructives.

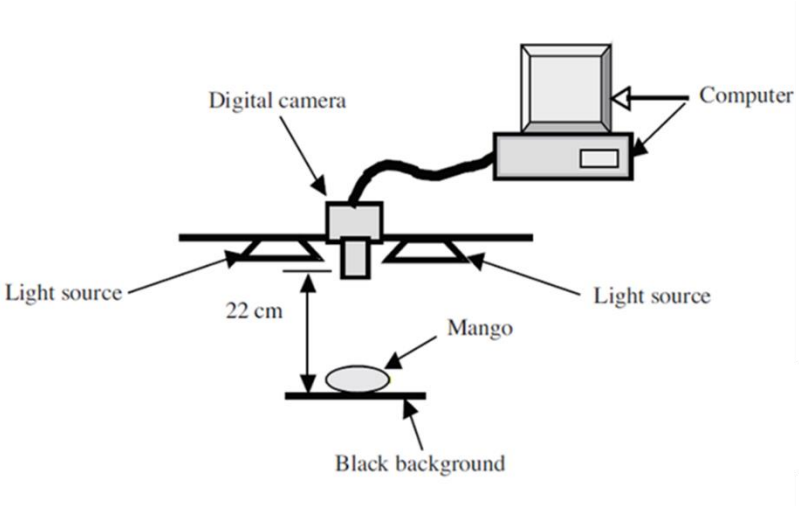


Figure 10: Système de vision par ordinateur (Teoh et Syaifudin, 2007)

1.11.5 Les méthodes de détermination du stade de maturité actuellement utilisées au Sénégal

Au Sénégal, l'évaluation du niveau de maturité des mangues export se fait majoritairement de manière subjective. Elle consiste en une inspection de la mangue sur la base de critères de maturité (l'enfoncement ou non du pédoncule, la forme aplatis ou arrondi du fruit, la rugosité du péricarpe) par des récolteurs formés à cet effet (ASEPEX, 2016). C'est un processus très susceptible d'erreurs en raison de la distraction, de la fatigue et de l'ennui de ces experts (Fmim *et al.*, 2017). Cette détermination peut aussi se faire par la coupure transversale à l'aide d'un couteau de quelques fruits pour évaluer le niveau de coloration de la pulpe (ASEPEX, 2016) ou pour procéder à l'extraction et l'analyse de l'échantillon interne du fruit (mesure de la teneur en solides solubles, l'acidité titrable , la teneur en matière sèche ou le pH). Ces méthodes très répandues sont de nature destructive et s'avèrent inefficaces du fait de l'hétérogénéité du niveau de maturité des mangues au sein de l'arbre et du verger.

D'après nos recherches, l'utilisation de l'analyse d'image pour l'estimation du niveau de maturité des mangues est restreinte au Sénégal. Le choix de cette méthode se justifie par la facilité de sa mise en œuvre, son coût abordable et sa capacité à analyser le fruit dans sa globalité de manière non destructive. La présente étude serait l'une des premières à aborder des aspects de l'usage de cette technique pour l'estimation de la maturité des mangues à partir des images en conditions non contrôlées.

1.12 Les méthodes de détection des dégâts de bioagresseurs sur fruits.

Dans la lutte contre les mouches des fruits, la reconnaissance des attaques des mouches des fruits sur les mangues en verger à un stade précoce est indispensable voire primordiale.

Habituellement, l'identification des symptômes se fait par observations visuelles. Cette observation vise à repérer la présence de manifestations extérieures des attaques. De telles attaques sont marquées par la transformation de l'épicarpe autour du point de ponte en une plaque sclérenchimateuse. Ces attaques peuvent aussi se traduire par l'épaississement du mésocarpe au-dessous de cette plaque et la dépréciation de l'aspect du fruit (Cochereau, 1970). Autrement, la reconnaissance des dégâts causés par les mouches sur les mangues, peut se faire par l'observation de l'orifice de sortie des larves de la peau du fruit. Une dissection des fruits s'avère parfois nécessaire pour confirmer les attaques pour les fruits présentant des manifestations extérieures d'attaques. La dissection des fruits attaqués révèle des galeries creusées par les larves et la présence de larves vermiformes dans la pulpe en décomposition (Ouédraogo, 2007). Ces méthodes conventionnelles d'identification des attaques des mouches des fruits sont peu efficaces, nécessitent un temps de travail énorme et sont difficiles à appliquer sur de grandes surfaces.

De nombreux auteurs proposent différentes techniques à l'aide du traitement numérique des images pour une identification précise des ravageurs et des maladies des plantes. Wang *et al. (*2013)ont proposé une méthode pour compter les insectes d'*Aphidoideas* sur les feuilles des plantes en utilisant un téléphone Android 2.0 pour la capture d'images RVB. Boissard *et al.* (2008) ont proposé une approche pour identifier et compter automatiquement les aleurodes (*Aleyrodidae*) sur les feuilles de rosiers en utilisant un scanner. Saranwong *et al.* (2010) et Saranwong *et al.* (2011) ont étudié la faisabilité de l'utilisation d'images hyperspectrales pour détecter les œufs et les larves de mouches des fruits (*Drosophila melanogaster*) dans des mangues intactes. Les travaux de Haff *et al*, (2013)sur des images hyperspectrales de mangues ont permis d'identifier les lieux d'infestation. Wang *et al.* (2011)ont développé un système d'imagerie hyperspectrale pour détecter les dommages causés par les insectes sur les fruits de jujubier. Dans une étude récente, Moscetti *et al.*, (2014) ont démontré la faisabilité de l'utilisation de la spectroscopie NIR pour détecter les dommages cachés causés par les insectes dans les châtaigniers. Dans le présent travail, il s'agira de tester les potentialités de détection des piqûres de mouches des fruits à partir d'analyses d'images RVB.

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

2.1 Présentation de la zone d'étude et du site de l'étude

2.1.1 Zone d'étude

Afin de répondre aux objectifs fixés, les travaux ont été menés dans un verger situé dans la région des Niayes. Le verger (14°47'45.18"N ; 17°13'48.98"O) choisi est proche de la station de recherche du Centre pour le Développement de l'Horticulture (CDH) de Sangalkam ce qui permet d'être à proximité du laboratoire d'entomologie et de faciliter ainsi la réalisation des manipulations.

Les Niayes (entre 14°30'-16° N et 16°6'-17°2' O) constituent une région écologique et morpho-pédologique située le long de l'Océan Atlantique, au Nord-Ouest du Sénégal. Elle se trouve entre la péninsule du Cap-Vert (Dakar), au Sud du pays et la vallée du fleuve Sénégal (Saint Louis), au Nord du pays. La topographie de la zone est caractérisée par des formations dunaires séparées par des couloirs interdunaires et entrecoupées de cuvettes et de dépressions où affleure la nappe et dont les sols sont plus ou moins argileux (Touré et Seck, 2005 ; Figure 11). Selon les sources, les Niayes fourniraient entre 50 à 70% de la production horticoles du pays (Fall et Fall, 2000). Le microclimat de la région fait que la mangue arrive en production après toutes les autres de la sous-région, lui offrant un avantage sur le marché international (Rey *et al.*, 2006).

2.1.2 Site de l'étude

Le verger d'étude s'étend sur une superficie de 0,7 ha (Figure 14b). Ce verger est de type diversifié selon la classification de (Grechi *et al.*, 2013). Dans le verger, les manguiers sont associés à d'autres espèces arborées (mimosae, palmiers et autres espèces) qui constituent une strate arborée intermédiaire. Du maraîchage est pratiqué sur certaines zones du verger, constituant une dernière couche de végétation au sol. Contrairement à la plupart des vergers diversifiés de la zone, ce verger ne contient pas d'agrumes. Les niveaux d'intrants dans ce verger sont moyens (les manguiers ne font pas l'objet de traitements phytosanitaires particuliers), les arbres sont taillés de manière irrégulière, les engrais organiques et l'eau sont apportés à travers le maraîchage. Les manguiers du verger sont de diverses variétés ('Kent', 'Keitt', 'Boucodiékhal' notée BDH) avec une dominance de la variété 'Kent' (Figure 12).

Tableau 1 : Caractéristiques du verger et estimation du rendement par imagerie drone en 2018

	Parcelle	**Moyenne Niayes**
Année de plantation	2007	
Surface culture annuelle	0.15 ha	
Nombre d'espèce arborée	3	
Nombre de manguier	123	320
Densité de plantation	143 arbre.ha^{-1}	107.8 arbre.ha^{-1}
Production moyenne par arbre	21.2 kg	83.2 kg
Rendement par hectare	4.5 t.ha^{-1}	6.8 t.ha^{-1}
Production totale	3.8 tonnes dont 3.5 tonnes de 'Kent'	17.4 tonnes

2.2 Matériels

Le matériel biologique utilisé dans cette étude est constitué d'une part des mangues de la variété 'Kent' récoltées à partir du stade de remplissage des fruits jusqu'à la maturité sur l'arbre. D'autre part, les mouches des fruits à différents stades de développement (larves, nymphes et adultes) ont été utilisées (Figure 13). Pour mener à bien l'étude, un certain nombre de matériel a été déployé (Tableau 2). Il regroupe :

- le matériel de terrain ayant servi à l'échantillonnage et à la prise des images des mangues dans le verger. Ce même matériel a été utilisé en laboratoire pour la prise des images mais en conditions contrôlées ;
- le matériel de laboratoire essentiellement utilisé pour les mesures morphologiques et physicochimiques des mangues ;
- le matériel utilisé pour le traitement et l'analyse des données

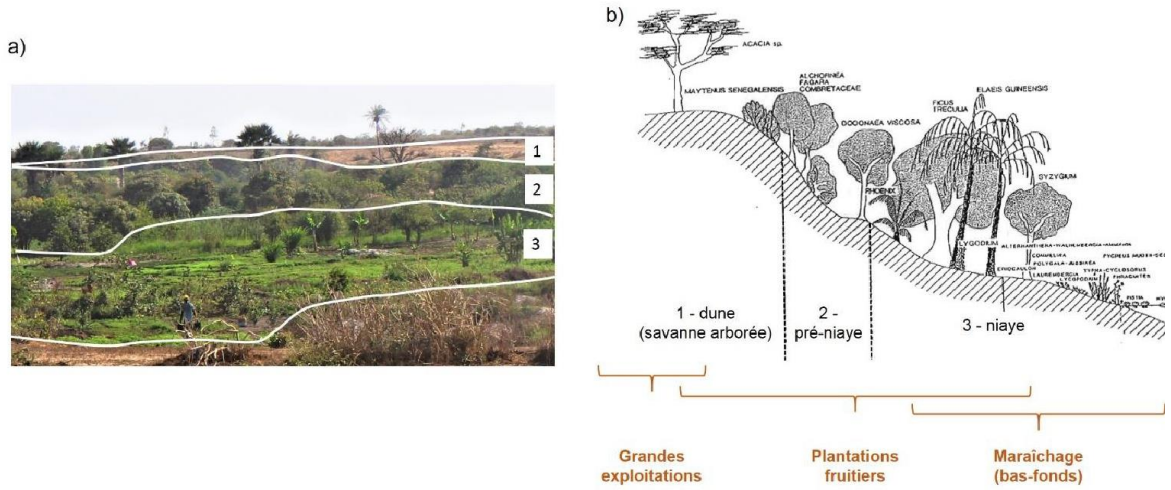


Figure 11: Photographie (a) et représentation schématique d'une niaye composée d'une dune (1) et d'un bas-fond (2 et 3). Les conditions pédoclimatiques et la topographie contraignent le type de culture (arbre ou maraîchage) et taille des exploitations (grande ou petite exploitation) (source schéma :Aguiar, 2009).

Figure 12: Carte d'occupation des sols du verger obtenue par drone (verger diversifié) avec les différentes variétés ('Kent', 'Keitt', 'BDH') de manguier (b).

Figure 13 : Image de mangue sur l'arbre (a), larves de mouches des fruits (b), nymphes (c) et adultes de mouches des fruits (d)

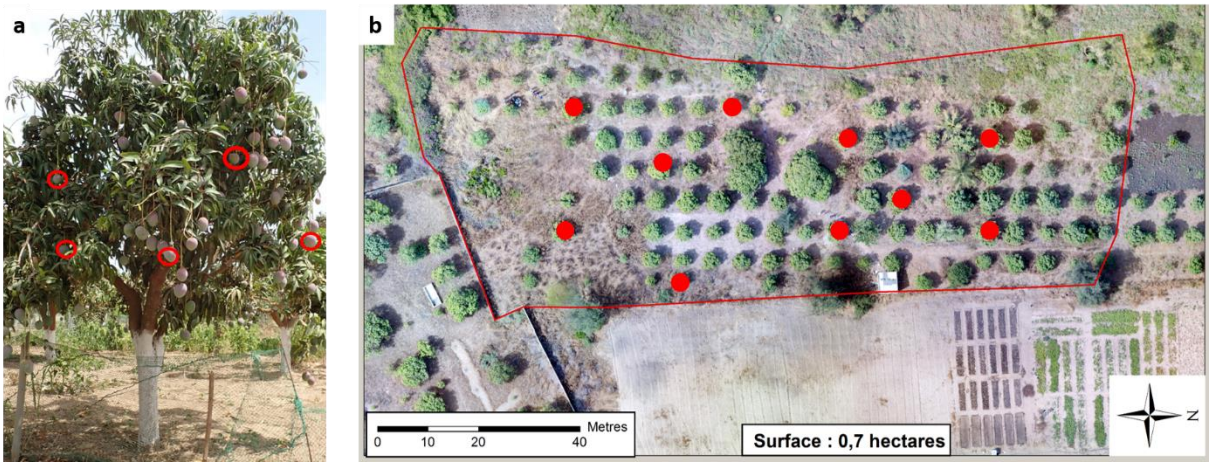


Figure 14 Schéma montrant le plan d'échantillonnage de mangue en verger

Tableau 2: Tableau récapitulatif des matériels utilisés dans le cadre de cette étude et leurs caractéristiques

Matériel	Utilité	Caractéristiques
	Terrain	
Carte d'occupation des sols	Identification des mangues de variété 'Kent' du verger	Drone DJI Mavic Pro (DJI Inc., Shenzhen, China)
Support solide de fond noir	Avoir un arrière-plan uni sur les images et faciliter la prise de vue	Planche en plastique + Papier A4 noir
Mire colorimétrique	Calibrage de la colorimétrie et la luminosité des images	Charte de gris Scuadra, Taille S, Dimension 8,8 x 5,1 cm
Mire métrique	Calibrage de l'échelle de l'image	Cercle de diamètre 5 cm
Appareil photographique	Prise des photographies RVB	Olympus Tough TG-5, 4K compact, Résolution: 12.0 mégapixels
	Laboratoire	
Balance de précision de cuisine	Prendre le poids des mangues	Portée 5kg - Précision : 1g - Fonction Unités : kg/lb/oz
Lampe de table avec ampoule	Contrôle de la luminosité	Ampoule LED blanche de 6 Watts, Kelvin = 4000 K, Fréq=50 Hz
Réfractomètre numérique	Mesure de la teneur en sucre du jus de mangue en pourcentage	PAL-1, ATAGO, Brix de 0,0 à 53,0%, precision ± 0,2 % Brix
Pied à coulisse	Mesure des paramètres morphologiques	Pied à Coulisse Numérique 200mm, INGCO
pH-mètre portable	Mesure du pH du jus de mangue	pH Meter SX711, , Range : -2.00~19.00 pH, precision: ±0.01 pH,
Burette graduée	Mesure de l'acidité titrable	Burette graduée de 50mL
Soude	Dosage du jus de fruits	Soude NAOH , Normalité : 0.1 N ± 0.5%, OXFORD LAB
Phénophtaléine	Indicateur coloré d'équilibre acido-basique	Formule: C20H14O4, Masse molaire : 318.32 g/mol
Eau distillée Compresse	Rinçage du matériel après usage ; Extraction du jus de mangue	-
Tasse et un pilon	Broyage de la pulpe de mangue	-
Poire à pipette + Pipette	Mesure de 10mL pour dosage	Poire de 25mL, pipette de 10mL
Fiche de collecte de données	Collecte des données de mesure	-
Sceaux + Sable tamisé	Incubation des mangues	Sceaux avec un tissu et une ficelle pour les fermer
Tamis, des boîtes de pétri, alcool	Tamisage du sable, extraction des mouches et conservation	-
	Traitement des données	
Ordinateur	Analyse d'images, analyses statistiques et rédaction de mémoire	ASUS, Core I7, RAM 8
Logiciel Photoshop	Préparation des images et Segmentation	Adobe Photoshop CC 2018
Logiciel Image J	Analyses d'images	Image J 1.52a
Logiciel R Studio	Analyses statistiques, classification	Rstudio version 1.1.463

2.3 Méthodes

2.3.1 Échantillonnage des mangues au verger

L'échantillonnage des mangues s'est fait sur 3 mois à compter de mai jusqu'à juillet 2019. Il a couvert 12 dates d'échantillonnage à raison d'un échantillonnage par semaine. À chaque date d'échantillonnage, 50 mangues 'Kent' sont sélectionnées aléatoirement sur 10 manguiers différents, à raison de 5 mangues par arbre (Figure 15).

Cet échantillonnage permet d'obtenir une variabilité dans le niveau de maturité des mangues provenant de la position du fruit dans l'arbre et des phénomènes d'asynchronisme et d'alternance. Les mangues ainsi sélectionnées sont étiquetées par un identifiant unique à l'aide de scotch et de marqueur permanent. Environ 600 mangues ont été échantillonnées au total.

2.3.2 Acquisition d'images

Les images RVB (Rouge, Vert, Bleu) de 24bits des mangues ont été prises avec un appareil photographique numérique disposé perpendiculairement à une distance d= 30 cm environ au-dessus du fruit et du support de fond noir (Figures 15 et 16). Cette acquisition d'images a été faite dans deux conditions différentes : en condition de lumière naturelle sur le terrain et en condition contrôlée au laboratoire.

Sur le terrain, les images sont prises sur des mangues encore accrochées à l'arbre, en journée et dans des conditions de lumière naturelle entre 9h et 14h. Une photo de chaque face de la mangue est prise avec l'identifiant du fruit, les mires colorimétriques et métriques. Les mangues dont les images ont été ainsi prises, sont ensuite amenées en laboratoire et nettoyées. Au laboratoire, les images des deux faces de la mangue sont prises ainsi qu'une photo de l'intérieur de la mangue, pour le suivi de l'évolution de la couleur de la pulpe, sous une source de lumière provenant d'une lampe de table (Figures 16 et 17).

Ainsi, 100 images de mangues sont alors obtenues en verger par date d'échantillonnage et 150 images au laboratoire pour un total de trois 3000 images collectées dans des formats JPEG et RAW. Toutes les images obtenues ont été renommées afin d'établir la correspondance entre chaque image et la mangue sur laquelle elle a été prise. Par exemple, l'identifiant complet d'une image pourrait être *SN_130519_F01_Ext_a*. A partir de cet identifiant, on pourrait lire qu'il s'agit de l'image d'une mangue qui a été échantillonnée au Sénégal le 13 mai 2019 et dont la face présente sur l'image est la face où l'épaule ventrale de la mangue est orientée vers la gauche.

2.3.3 Mesures morphologiques et physicochimiques des mangues au laboratoire

Sur chaque fruit échantillonné, 05 paramètres morphologiques sont évalués (Figure 18). Ces paramètres sont le poids (g), la longueur du fruit ou hauteur(cm) qui est la distance entre le pédoncule de la mangue et son apex, la petite largeur (cm) qui est la distance entre les deux faces de la mangue et prise au niveau de l'épaule ventrale, la grande largeur (cm) qui est la distance entre l'épaule ventrale et l'épaule dorsale ; le périmètre ou la circonférence du fruit (cm).

Plusieurs paramètres physicochimiques sont mesurés à partir du jus de mangue ainsi extrait de la pulpe des mangues (Figure 19). On distingue notamment la teneur totale en éléments solubles (%) ou teneur en sucre (TSS), exprimée en °Brix. Elle est obtenue en mettant 2 à 3 gouttes du jus sur le prisme du réfractomètre. Le pH, est mesuré grâce au pH-mètre numérique qui est d'abord étalonné à l'aide de solutions de pH=4 et pH=7. Ensuite, la sonde du pH-mètre est introduite dans le récipient contenant le jus pour relever la valeur de son pH. L'acidité titrable (TA) est mesurée par titration manuelle et exprimée en meq/L. Elle est obtenue par prélèvement de 10mL de jus à l'aide d'une propipette. Un ajout de 3 gouttes de phénophtaléine (indicateur coloré) est fait sur le jus de mangue prélevé. Le mélange du jus et de la phénophtéléine et disposé sous la burette graduée contenant de la solution de soude. La solution de soude est déversée goutte à goutte jusqu'à l'observation d'un changement de couleur (apparition d'une coloration rose). On reporte les valeurs de volume de soude contenue dans la burette avant manipulation et après le changement de couleur (équilibre acido-basique).

Figure 15: Schéma illustrant le processus d'acquisition d'images en verger

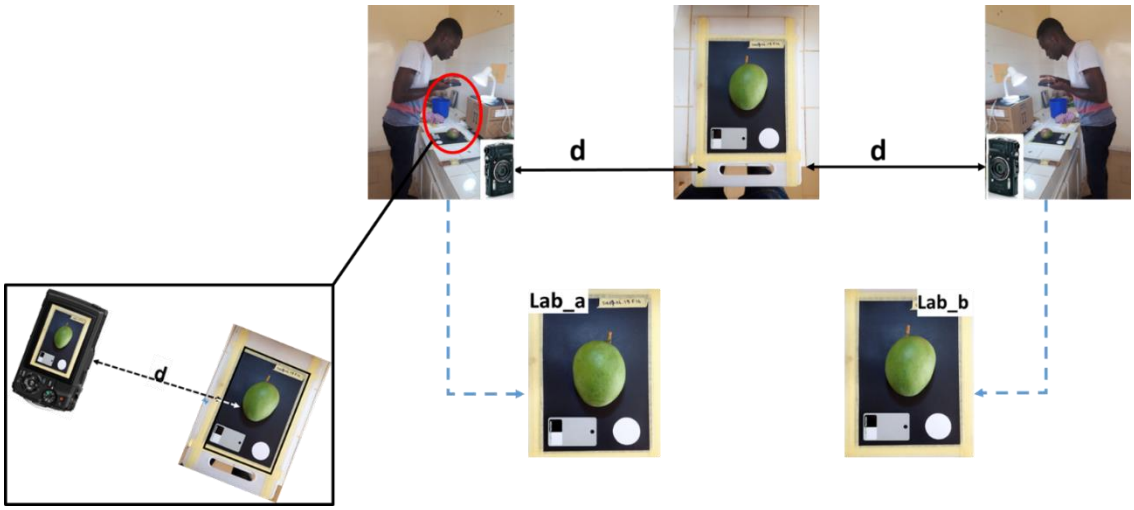


Figure 16: Schéma montrant le processus d'acquisition des images en laboratoire des faces extérieures de mangues

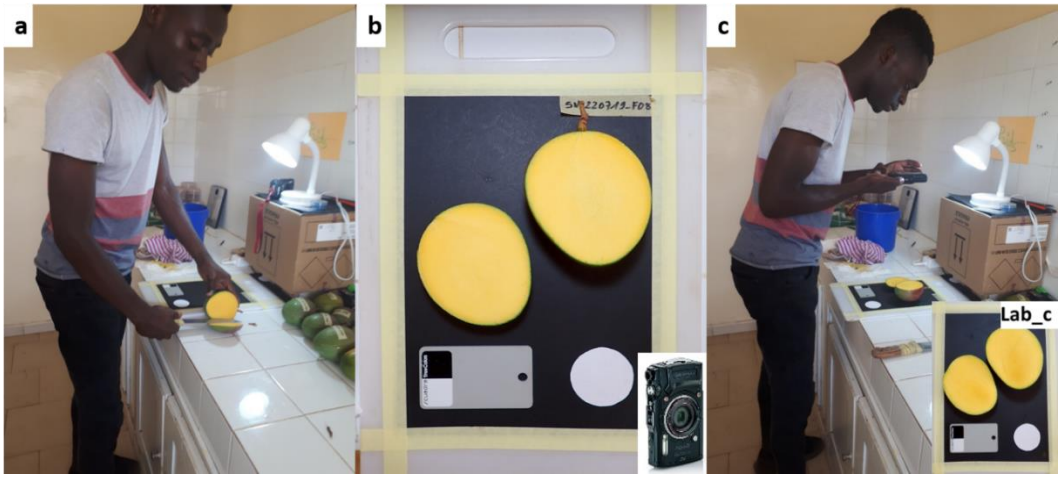


Figure 17: Schéma montrant le processus d'acquisition des images en laboratoire des pulpes de mangues

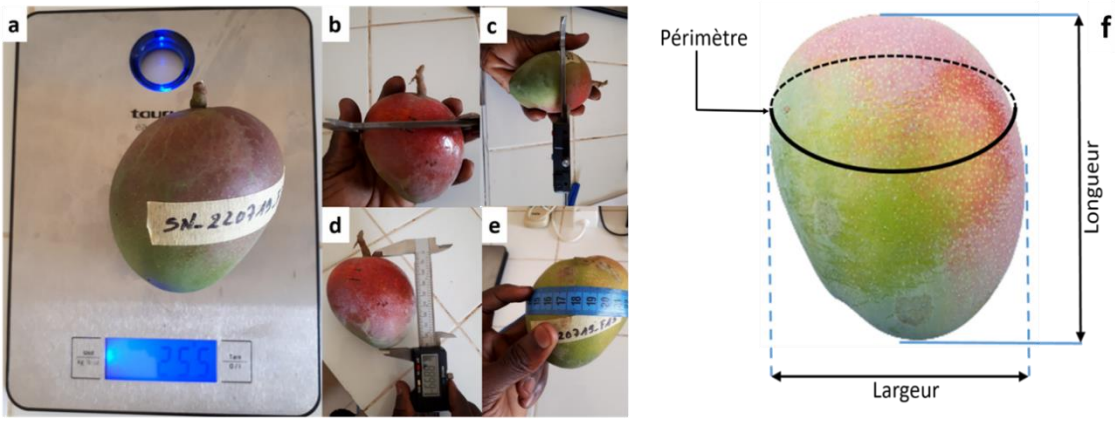


Figure 18: Mesure du poids de la mangue (a), de la grande largeur (b), de la petite largeur (c), de la longueur (d) et du périmètre de la mangue (e), détails des mesures morphologiques (f).

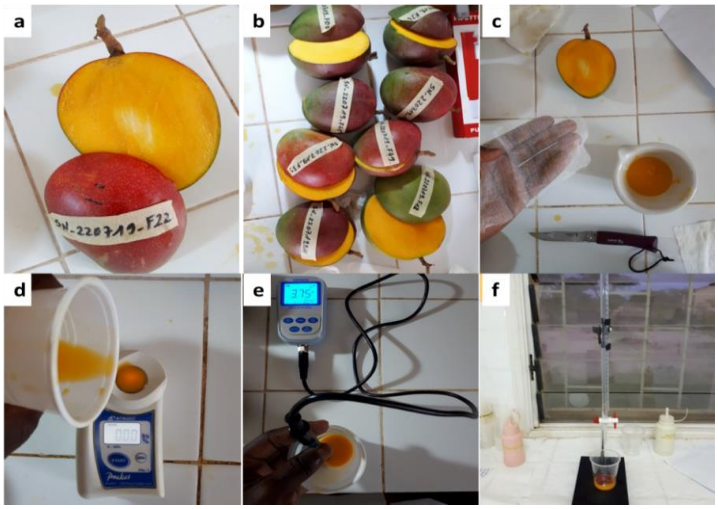


Figure 19 : Matériels utilisés pour la mesure des paramètres physicochimiques de la mangue. Mangue découpée (a, b) pour l'extraction du jus (c), mesure de la teneur en sucre soluble avec un réfractomètre (d), mesure du pH de la mangue avec un pH-mètre, mesure de l'acidité titrable de la mangue (f).

2.3.4 Estimation des classes de maturité des mangues

Les images de la pulpe des mangues acquises au laboratoire ont servi à classer les mangues en cinq niveaux de maturité (Figure 20). Cette classification s'est faite en se basant sur la grille de couleur de la pulpe développée par l'université de Floride et l'Université de Californie-Davis. La couleur de la pulpe est généralement le meilleur indicateur de la maturité et du mûrissement (UC Davis, 2010). Au total 600 images ont passé cette phase de classification. Ainsi, 45 % des mangues échantillonnées ont été classées de niveau de maturité M1, 13% de niveau de maturité M2, 15% de niveau de maturité M3, 15% de niveau de maturité M4 et 12% de niveau de maturité M5.

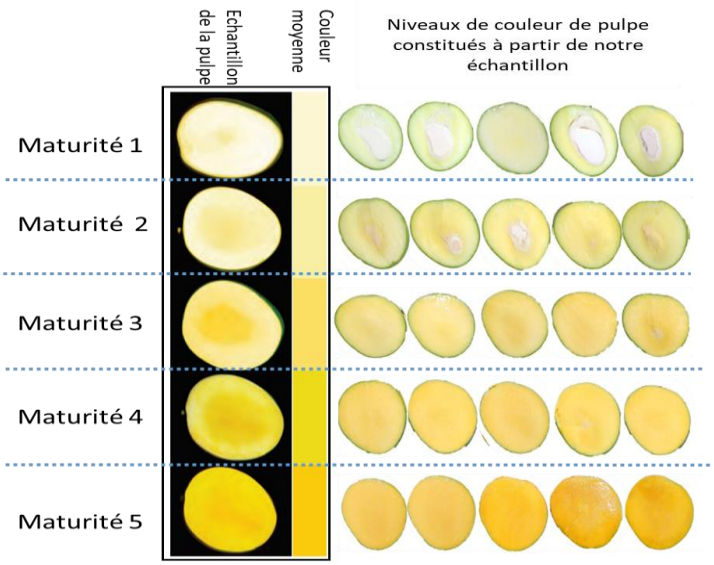


Figure 20: Grille de référence de la classification du niveau de maturité des mangues proposée par l'UC Davis (en encadré) et charte de couleur constitué à partir des images de mangue provenant de notre échantillonnage.

2.3.5 Données sur les piqûres des mouches des fruits

Les mangues une fois amenées au laboratoire sont nettoyées et examinées en vue d'identifier visuellement s'il y a d'éventuelles piqûres de mouches des fruits. Dans le cas où les mangues présentaient des piqûres de mouches des fruits, ces dernières étaient comptées et notées.

2.3.5.1 Incubation des mangues

Après l'étape de la photographie et des analyses physicochimiques, chaque mangue sélectionnée est mise en incubation (Figure 21). L'échantillonnage des mangues à incuber a été fait sur 12 dates avec un pas de 5 mangues. Pour chacune des 10 premières dates d'échantillonnages, 10 mangues sélectionnées aléatoirement ont été mises en incubation et 20 mangues pour les 2 dernières dates d'échantillonnage. Ceci en raison du potentiel élevé d'obtention de piqûres de mouches en fin de saison. Des suivis ont été fait pour l'extraction des pupes de mouches des fruits sur toute la période d'incubation.

Figure 21 : Mise en incubation des mangues pour extraire les pupes. Incubation de la mangue (a), tamisage (b, c, d) et extraction des pupes (e, f).

2.3.5.2 Extraction des pupes de mouches des fruits ou de larves

Pour chaque mangue incubée, 2 extractions ont été réalisées : la première 10 jours après l'incubation et la seconde à 16 jours. L'extraction proprement dite a été faite de deux façons différentes. En effet, lorsque la mangue est pourrie et le sol mouillé on procède à une extraction à base d'eau (Figure 21d et Figure 21e). Cette méthode consiste à laver le contenu du seau y compris la mangue et son amande pour récupérer les pupes ou les larves à l'aide d'un tamis à maille fine. Dans le second cas, c'est-à-dire lorsque la mangue n'est pas pourrie et que le sol est resté sec, on procède à un tamisage sans ajouter de l'eau (Figure 21b et Figure 21c). Les

pupes ainsi obtenues après tamisage sont comptées et conservées dans des boîtes de pétri portant des étiquettes correspondantes à l'identifiant de la mangue. Enfin, le nombre de mouches émergées à partir des pupes a été relevé et noté pour chaque mangue incubée (Figure 13c et 13d)

2.4 Analyse des images de mangues

Dans cette étude, la procédure d'analyse des images de mangues est réalisée en 3 étapes : i) prétraitement des images ; ii) segmentation et iii) extraction des caractéristiques des mangues et construction de la base de donnée.

2.4.1 Pré traitement des images

Le prétraitement est une procédure visant à traiter une image pour une tâche spécifique afin que l'image traitée soit plus facilement analysable que l'image d'origine. Le prétraitement des images des mangues a consisté en une calibration de l'échelle et un réglage de la balance des blancs.

a- Calibration de l'échelle des images

La mesure des paramètres morphologiques à partir d'une image nécessite la conversion des dimensions x et y (en pixels) de l'image dans des unités dimensionnelles réelles. Cette opération sert à convertir en une unité de mesure, ici le centimètre, les mesures faites sur les images, initialement en pixels. La mire métrique de longueur connue de 8,8 cm est donc utilisée pour calculer la taille et la surface moyenne d'un pixel. Un facteur de calibrage d'échelle (*f*) a été déterminé comme suit:

$$f = \frac{longueur\ connue\ de\ la\ mire\ (cm)}{nombre\ de\ pixels\ (pixels)}$$ avec f la taille réelle du pixel (cm); équation (1)

Le nombre de pixels est calculé ici sur la base de la moyenne de la longueur de la mire mesurée sur 51 images. On obtient ainsi un nombre moyen de pixels de 1 134 pixels.

Autrement dit, une mesure de 8,8 cm sur une image correspondrait à 1 134 pixels soit

$$f = \frac{8{,}8\ (cm)}{1134\ (pixels)}$$ = 7,75E-03 cm ; équation (2)

Sur les images, la longueur moyenne d'un pixel est donc de 7,75E-03 cm.

La surface moyenne d'un pixel (cm²), notée S, est donc de S= 6,01E-05 cm².

Les mesures pour cette calibration ont été faite avec le logiciel Image J (Image J Version 1.52a).

b- Réglage de la balance des blancs

Le maintien des conditions de prises de vue est important en analyse d'image. Les valeurs RVB d'une image dépendent des propriétés spectrales de la source de lumière et du dispositif utilisé lors de la prise des images (Ibaraki et Gupta, 2014). La balance des blancs est une opération de réglage qui consiste à corriger une dominante de couleur dans le but d'obtenir des couleurs qui soient le plus proche possible de la réalité de la scène photographiée (Loic, 2012). Dans le cas de notre étude, la balance des blancs a été réalisée en prétraitement à l'aide de la mire colorimétrique (Figure 17) de couleur gris neutre et de l'outil pipette du logiciel Photoshop pour définir les points gris. Avec cet outil, on clique sur la mire et on obtient une correction de la balance des blancs de l'image.

2.4.2 La segmentation

La segmentation consiste en la manipulation et l'analyse des pixels d'une image entière dans le but d'identifier et isoler un objet d'intérêt (Martínez-Sandoval *et al.*, 2012; Prakash *et al.*, 2017). La méthode de segmentation par seuillage est celle que nous utilisons car c'est une des méthodes de segmentation les plus utilisées et les plus simples (Ibaraki et Gupta, 2014; Prakash *et al.*, 2017). Ces valeurs seuils peuvent être générées manuellement ou automatiquement. Dans notre travail, la segmentation qui consiste en une extraction des pixels représentant la mangue sur l'image, de son arrière-plan, s'est faite en trois étapes. Elle commence par un détourage avec le logiciel Adobe Photoshop pour obtenir des images de mangue avec un fond uni. Ensuite, les images RVB ont été importées dans Image J et converties en images 8 bits (une image ne prenant en compte que 2 niveaux de couleurs, blanc et noir).
L'algorithme global de segmentation par seuillage de l'histogramme (Figure 22b) utilisé pour convertir l'image source en image binaire est donné par l'équation (équation 3):

$$g(x,y) = \{1, for\ f(x,y) > T\ 0, for\ f(x,y) \leq T \quad \text{équation (3)}$$

où g(x,y) est défini comme l'image seuillée, f(x,y) est l'image source et T est la valeur du seuil. Tous les pixels de l'image source dont les informations de couleur sont égales ou inférieures à T sont convertis en 0 et considérés comme fond (blanc) et les pixels dont les informations de couleur sont supérieures à T sont convertis en 1 et considéré comme un pixel d'objet (noir) (Otsu, 1979). Les valeurs seuils de pixels déterminées automatiquement sont de 0 et 254. A partir de ces valeurs de seuillage, toutes les images des mangues ont été segmentées en batch.

L’image seuillée est une image binaire, qui une fois superposée à l’image originale, permet d’extraire les pixels couleurs de la mangue.

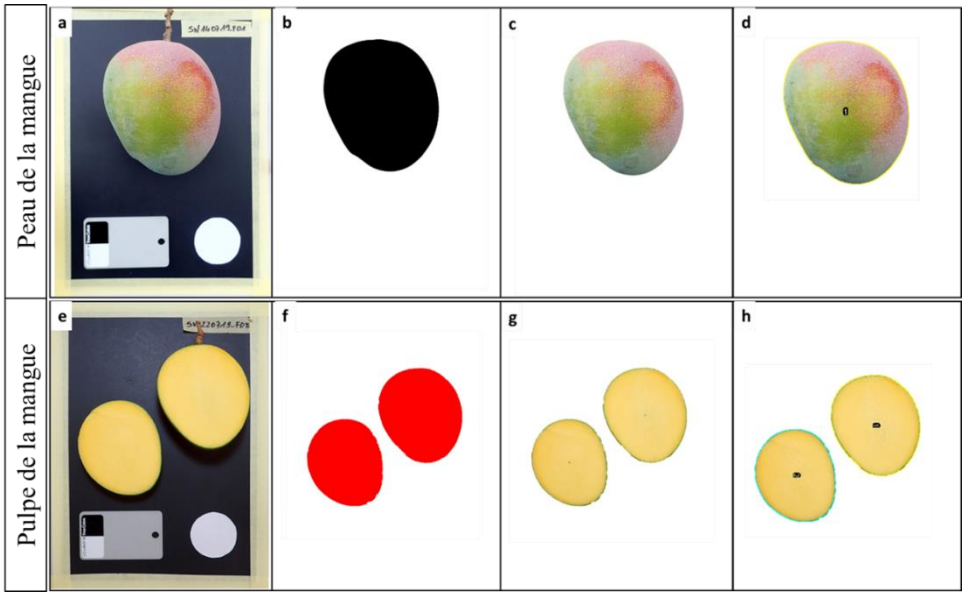


Figure 22 : Processus de segmentation d’une image pour obtention d’une région d’intérêt (la mangue). Image avant segmentation (a, e). Conversion de l’image RGB en image 8bits et suppression de l'arrière-plan (b, f). Nouvelle image avec un arrière-plan uni (c, g). Sélection de la mangue pour analyse ultérieure (d, h).

2.4.3 Extraction des caractéristiques

Une fois la segmentation des images réalisée, l’étape suivante est celle de l’extraction et la sélection de caractéristiques des mangues. Les caractéristiques les plus communes qui décrivent globalement une image ou les objets d’une image sont la couleur, la forme et la texture. Chaque caractéristique peut être décrite par plusieurs indices. Le calcul et la sélection d’indices pertinents sont des étapes importantes en détection et classification d’objets sur une image (Saxena et Armstrong, 2014). Dans cette étude, plusieurs indices relatifs à la couleur et la forme des mangues sont calculés sur les images de mangues segmentées. Les indices mesurés sont ensuite sélectionnés (étape dite de « réduction ») afin de garder les plus pertinents pour l’estimation de la maturité des mangues.

a- Indices de couleur

La couleur fait partie des mesures d’objets les plus pertinentes pour la compréhension des images et la description des objets. Elle produit une information de base à la perception humaine (Sun, 2008; Martínez-Sandoval *et al.*, 2012). La couleur visible par l’œil nu, peut être représentée dans un espace colorimétrique. La couleur visible est généralement représentée

comme une combinaison de tri stimuli R (rouge), V (vert) et B (bleu) qui sont les trois couleurs primaires dont le mélange permet d'avoir toutes les autres couleurs (Cheng *et al.*, 2001).

D'autres types de représentations de la couleur peuvent êtres dérivées de l'espace colorimétrique RVB par transformation linéaire ou non linéaire grâce à des formules mathématiques (Figure 23a). Elles peuvent se faire aisément à partir de logiciels d'analyse d'image. Ainsi, on pourrait passer de l'espace colorimétrique RVB à l'espace HSB (hue, saturation, brightness en français teinte, saturation, luminosité) ou à l'espace CIELAB (L*a*b).

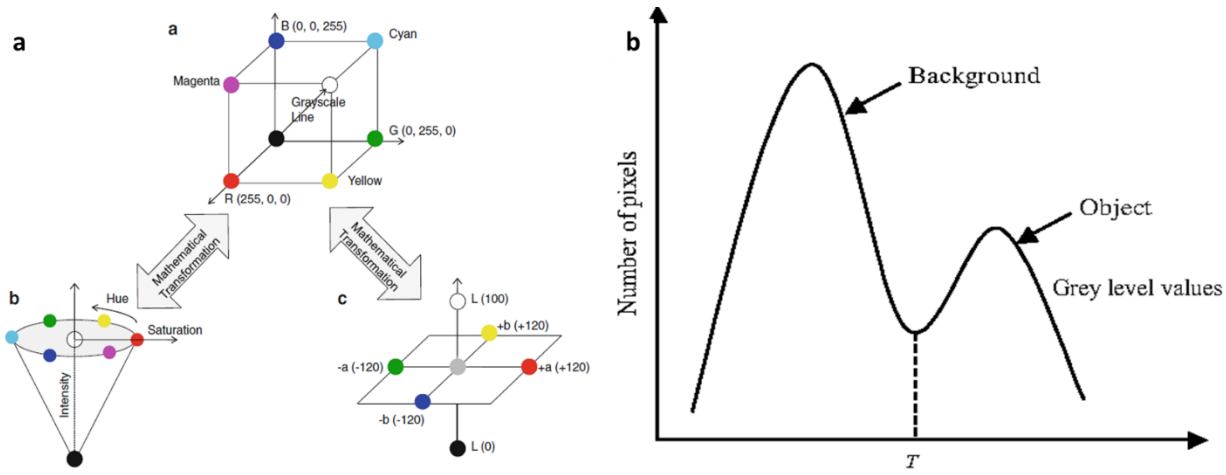


Figure 23: a-Espaces de couleur couramment utilisés : (a) cube de couleur RVB ; (b) cône de couleur HSV ; et (c) système de couleur CIELAB ou L*a*b ; b-Histogramme de segmentation par seuillage (Teoh et Syaifudin, 2007).

Dans nos travaux, les valeurs moyennes, les écart types et les valeurs minimales et maximales de chaque bande de couleur des 3 espaces colorimétriques ont été extraites des images de mangues segmentées. Ces indices ont permis la comparaison des mangues à partir des informations de couleur. Les calculs des indices de couleurs ont été réalisés sur ImageJ.

b- Indices de forme

Les systèmes d'analyse d'images proposent une panoplie de mesures liées à la forme des objets (Mendoza et Lu, 2015). Sur chaque image de mangue segmentée, la surface, le périmètre (Menu image J), la longueur des axes mineurs (largeur) et majeur (longueur) des mangues. La surface de chaque mangue a été exprimée en centimètres carrés. Le périmètre est la longueur de la limite extérieure (bordure) de la mangue. Les axes majeurs et mineurs sont identifiés en ajustant une ellipse autour du fruit (Mendoza et Lu, 2015).

Des indices de formes plus complexes ont été également utilisés. Ces indices sont des mesures dimensionnelles physiques caractérisant l'apparence d'un objet. Il s'agit de la circularité, la rondeur, l'aspect ratio et la solidité (Raja Sekar *et al.*, 2018) . Tous ces indices

ont été mesurés automatiquement par les algorithmes de calculs du logiciel ImageJ sur l'ensemble des images et ceci en batch. La circularité est la mesure de l'écart de la forme de l'objet par rapport à un cercle parfait, sa mesure est donc intéressante pour l'analyse des particules. La rondeur s'assimile à la circularité sauf que son calcul se fait sur la base du plus grand diamètre de l'objet. L'aspect ratio est le rapport entre le plus grand axe et le petit axe de l'objet. La solidité est un facteur de forme qui se mesure en faisant le rapport entre la surface et la surface convexe.

2.5 Estimation des niveaux d'infestation des mangues par les mouches des fruits par analyse d'image

Le comptage des piqûres de mouches des fruits sur les images s'est fait avec le logiciel ImageJ (Figure 24). Il a été fait manuellement et s'est basé sur des illustrations des dégâts pouvant être considérés comme des piqûres de fruits du guide export mangue (ASEPEX, 2016). Généralement les piqûres de mouches sont petites, avec une coulure de larmes sur le fruit et ne font pas de grosses taches marron. Les piqûres vieilles d'au moins 48 heures se présentent sous forme de petites taches nécrotiques noires. A l'aide de l'outil 'multi point' de ImageJ, les piqûres de mouches ont été comptées sur les images de chaque mangue en considérant les 2 faces. Ceci a permis d'avoir une base de données pour lier le nombre de piqûres de mouches au niveau de maturité des mangues en utilisant les paramètres de qualités que sont la teneur en sucre soluble, l'acidité titrable et le pH de la mangue.

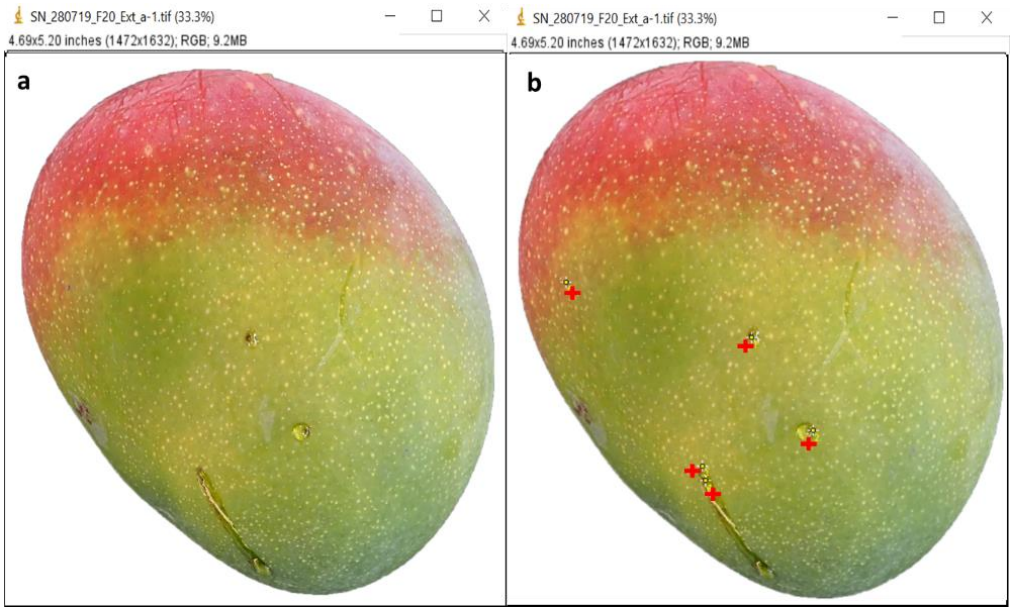


Figure 24 : Illustration du processus de comptage des piqûres de mouches sur mangue. Image avant comptage des piqûres (a) et après comptage des piqûres (b).

2.6 Analyses statistiques

Les analyses statistiques faites dans cette étude ont été faites avec le logiciel R. Il a été d'abord fait une analyse descriptive des données dans le but d'apercevoir la distribution des variables prises en compte dans l'étude. Cette analyse descriptive a consisté en un calcul des paramètres et position de dispersion (Tableau 3).

L'étude de la distribution des variables a été faite par des tests de normalité de Shapiro et des histogrammes. A l'issue de cette phase d'analyse exploratoire, nous avons procédé à la transformation logarithmique des variables qui ne suivaient pas une distribution normale notamment le pH, la teneur en sucre et l'acidité titrable. La transformation logarithmique a amélioré la normalité de la distribution des données de la teneur en sucre soluble. Les valeurs de teneur en sucre soluble utilisées pour la suite des analyses étaient les valeurs logarithmiques. Les données des autres variables ont été maintenues comme telles étant donné que la transformation logarithmique n'avait pas amélioré la distribution des données.

Des boîtes à moustaches montrant l'évolution des paramètres morphologiques et physicochimiques de la mangue ont été réalisées. Il a été réalisé des tests d'Analyse de la Variance (ANOVA) suivi des tests de comparaison multiple de turkey (HSD test) pour voir l'effet des paramètres morphologiques et physicochimiques sur la maturité de la mangue. Ces mêmes tests nous ont permis de comparer les paramètres physicochimiques et morphologiques des mangues à différentes dates d'échantillonnages. Nous avons fait des tests de corrélation de Spearman et des régressions linéaires pour évaluer le type et le degré de relation qui existe entre ces paramètres.

Des modèles linéaires ont été établi pour estimer les paramètres physicochimiques des mangues à partir des indices de formes et de couleur obtenus par analyse d'images. Pour la modélisation, seuls les paramètres d'entrée (i.e., indice de forme et de couleur) ayant un effet significatif dans la construction du modèle avaient été retenus comme paramètres explicatifs du modèle (''Backward selection''). Au préalable, des Analyses en Composantes Principales (ACP) ont été faites pour réduire certaines variables trop corrélées entre elles (Figures en Annexe).

Des modèles linéaires généraux (famille : quasipoisson) ont été utilisés pour évaluer la relation entre les paramètres physicochimiques de la mangue et la fréquence de piqûres des mouches des fruits. Le choix de ce type de modèle se justifie par l'abondance de valeurs zéro dans le jeu de données.

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Le tableau 3 résume les valeurs moyennes, minimales, et maximales des paramètres morphologiques (poids, longueur, petite et grande largeurs, périmètre) et des paramètres physicochimiques (teneur en sucre soluble, l'acidité titrable et le pH).

Tableau 3**:** Analyse descriptive des paramètres morphologiques et physicochimiques mesurés au laboratoire.

	Minimum	Moyenne	Maximum	Ecart type
Poids de la mangue (g)	91	677	327,3	107
Longueur de la mangue (cm)	6,4	12	9,5	1,1
Grande largeur de la mangue (cm)	4,6	11,1	8,1	1,1
Petite largeur de la mangue (cm)	4,1	9,2	6,9	0,9
Périmètre de la mangue (cm)	16,3	33	24,8	2,9
Teneur en sucre soluble de la mangue (°Brix)	4,2	22,5	8	2,8
Teneur en pH de la mangue	2,7	5,7	3,5	0,4
Acidité titrable de la mangue (meq/L)	0,2	2,1	1	0,38

3.1 Evolution des paramètres morphologiques au cours du temps

On observe une évolution des paramètres morphologiques de la mangue (le poids, la longueur, les largeurs grande et petite et le périmètre) au cours du temps. Cette augmentation est plus importante pendant les premières semaines (1er jour au 42ème jour) et a tendance à atteindre des valeurs optimales lorsque la mangue atteint un certain niveau de maturité au cours des dernières semaines d'échantillonnage (43ème jour au 62ème jour). Il a été observé également une différence significative entre les valeurs des paramètres morphologiques de la mangue au cours du temps (Figure 25).

Les ANOVAs montrent une différence significative (F=397.23, p-value<0,005***) entre les poids moyens des mangues récoltées à différentes dates d'échantillonnages. Les tests HSD révèlent qu'il n'y a pas de différence significative entre les poids moyens des mangues récoltées au 1er et 6ème jour d'échantillonnage ni entre les poids moyens des mangues récoltées au 14ème, 21ème et au 28ème jour. Le même constat a été fait pour les mangues récoltées au 35ème jour, 48ème jour et au 76ème jour. Par contre, les mangues récoltées au 42ème jour et au 62ème jour ont des poids moyens significativement différents des mangues récoltées les autres jours. Les mangues récoltées au 70ème jour ont un poids moyen significativement différents du poids moyen des mangues récoltées les autres jours d'échantillonnage (Figure 25).

Une différence significative (F=444.66, p-value<0,001***) entre les périmètres moyens des mangues récoltées à différentes dates d'échantillonnages a été observée. Les tests HSD révèlent qu'il n'y a pas de différence significative entre le périmètre moyen des mangues

récoltées au 1er et 6ème jour ni entre le périmètre moyen des mangues récoltées au 35ème, 48ème, 70ème et au 76ème jours. Il en est de même pour les mangues récoltées au 42ème et au 55ème jour. Par contre les mangues récoltées au 14ème jour, 28ème jour, 62ème jour ont des périmètres moyens significativement différents du périmètre moyen des mangues récoltées les autres jours.

Lorsqu'on s'intéresse à la longueur de la mangue, on observe une différence significative (F=148.25, p-value<0,001 ***) entre la longueur moyenne des mangues récoltées à différentes dates d'échantillonnages. Les tests HSD montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre la longueur moyenne des mangues récoltées au 1er et au 6ème jour ni entre les mangues récoltées au 14ème jour et au 21ème jour. Le même constat a été fait pour les mangues récoltées aux 28ème, 70ème et 76ème jours mais aussi pour les mangues récoltées aux 35ème, 42ème, 55ème et 62ème jour. Par contre les mangues récoltées au 48ème jour ont une longueur moyenne significativement différente de la longueur moyenne des mangues récoltées les autres jours.

En ce qui concerne la grande largeur des mangues, l'ANOVA réalisée révèle qu'il y a une différence significative (F=423.82, p-value < 0,001***) entre la moyenne de la grande largeur des mangues récoltées à différentes dates d'échantillonnages. Les tests HSD montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre la moyenne de la grande largeur des mangues récoltées aux 1er et 6ème jours, ni aux 14ème, 22ème et 28ème jours. Ce même constat a été fait pour les mangues récoltées aux 14ème, 22ème et 28ème jours mais aussi pour celles récoltées aux 35ème et 55ème jour. Il en est de même pour les mangues récoltées aux 42ème et 62ème jours d'une part et celles récoltées aux 48ème,70ème et au 76ème jours d'autre part.

La même tendance s'observe lorsqu'on regarde l'évolution de la petite largeur des mangues au cours du temps. L'ANOVA montre qu'il y a une différence significative (F=952.28, p-value < 0,001***) entre la moyenne de la petite largeur des mangues récoltées à différentes dates d'échantillonnages. Le test HSD montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre la moyenne de la petite largeur des mangues récoltées aux 14ème, 22ème et 28ème jour ni entre la moyenne de la petite largeur des mangues récoltées aux 35ème et 48ème jours. Le même constat s'opère pour la moyenne de la petite largeur des mangues récoltées aux 42ème, 55ème, 70ème et au 76ème jour. Par contre, il y a une différence significative entre la moyenne de la petite largeur des mangues récoltées aux 1er, 6ème, 35ème et au 62ème jours et les autres dates d'échantillonnages.

A partir de l'observation de l'évolution de ces paramètres morphologiques on constate que les valeurs les plus élevées de poids, de périmètre, de longueur et de largeurs sont généralement observées au 62ème jour. De plus les valeurs moyennes des paramètres

morphologiques observées à cette date sont souvent significativement différentes des valeurs observées les autres dates d'échantillonnages.

Ces résultats sont similaires à ceux des travaux de Jha *et al.*, (2006); Abu, (2010); Wongmetha *et al.*, (2015) qui rapportent que le poids moyen, la longueur, la largeur des mangues augmentent tout au long de la croissance des mangues jusqu'à la maturité physiologique. L'étude des indicateurs morphologiques (la longueur, le diamètre, la circonférence, le poids, le volume, la couleur ou la forme du fruit) réalisée par Subramanyam *et al.*, (1975) sur le cultivar 'Alphonso', a montré que la mangue croît rapidement à partir de la cinquième semaine après induction du fruit, puis sa croissance ralentit entre la 9ème et la 14ème semaine : sa croissance suit donc une courbe sigmoide.

Les valeurs de taille faibles observées plus tardivement (70ème jour au 77ème jour) s'expliquent par la récolte des gros fruits qui a été faite par le producteur à partir du 70ème jour. Ceci pourrait aussi s'expliquer par le ratio feuille/fruit faible en fin de saison. En effet, les travaux de Léchaudel et Joas, (2006) rapportent que la taille de la mangue est plus petite quand le ratio feuille/fruit est faible (Léchaudel et Joas, 2006; Dambreville, 2013)

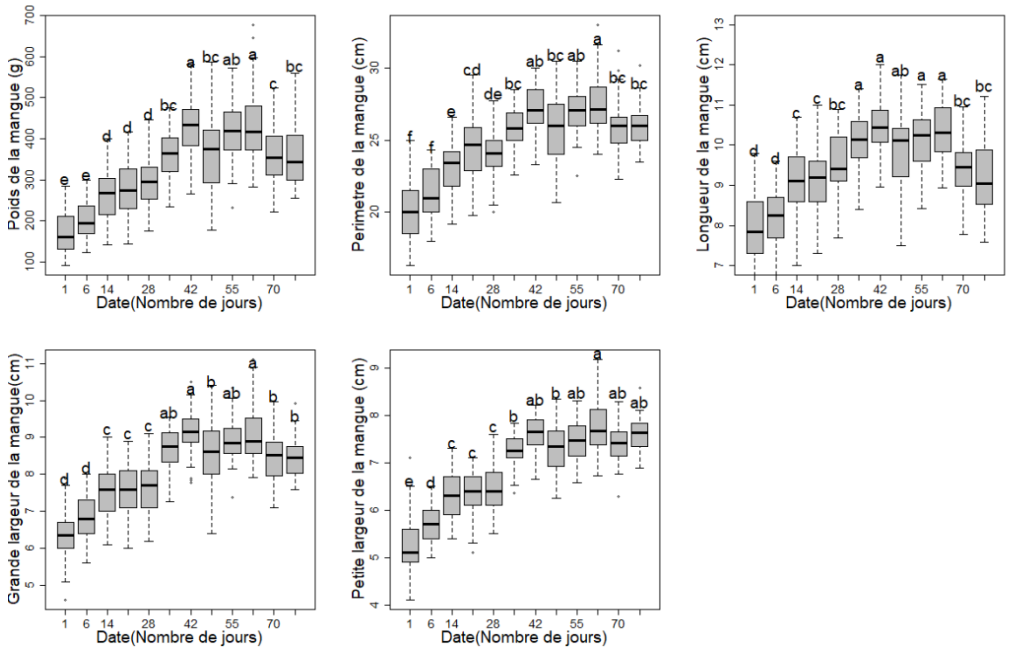


Figure 25: Représentation de l'évolution des paramètres morphologiques de la mangue au cours du temps

3.2 Evolution des paramètres physicochimiques au cours du temps

On observe une évolution instable de la teneur en sucre soluble exprimée ici en °Brix. L'interprétation des box plots de la Figure 26 montre qu'il y a une augmentation en début de maturation, de la teneur en sucre soluble (1er au 15ème jours ; mai) qui s'accompagne ensuite

d'une diminution (du 16ème au 60ème jours; fin mai- début juillet) avant de connaître une augmentation brusque et forte plus tard lorsque la mangue commence à mûrir (du 70ème au 77ème jours; 2 dernières semaines, fin juillet). La teneur en sucre des mangues immatures est faible comparée à la teneur en sucre des mangues matures.

A partir des ANOVAs, il a été constaté une différence significative entre la teneur en sucre moyenne des mangues récoltées à différentes dates. Le test HSD a montré qu'il n'y a pas de différence significative (F= 18.83, p-value < 0,001***) entre la teneur en sucre moyenne des mangues récoltées aux 1er, 6ème et 28ème jour ni entre la teneur en sucre moyenne des mangues récoltées aux 70ème et 76ème jour. Le même constat est fait pour les mangues récoltées aux 55ème et 62ème jour. Les valeurs de la teneur moyenne des mangues récoltées les autres dates d'échantillonnages sont significativement différentes. On remarque que les mangues présentant une forte teneur en sucre sont celles récoltées beaucoup plus tard dans la saison.

Dans la littérature, le Brix semble augmenter au cours de la maturation du fruit (production de plusieurs sucres). En effet, l'amidon s'accumule pendant la croissance des mangues, avant d'être hydrolysé lors de leur maturation ce qui se traduit par une diminution de la teneur en amidon dans les mangues (Leley, *et al.*, 1943; Kalra et Tandon, 1983). Pendant ce temps, on observe une accumulation progressive des sucres solubles (glucose, fructose et saccharose) jusqu'à la prématuration (Hulme, 1971). A ce stade de la maturation, la concentration en sucres totaux, glucose et fructose augmente brutalement (Briot, 1999). Léchaudel et Joas, (2006) confirment que l'augmentation de la teneur en sucres solubles à la fin de la croissance des fruits est corrélée à la fois avec une augmentation du saccharose et dans une moindre mesure du fructose et du glucose. Il y a donc des phases de changement de la teneur en sucres solubles. Jha *et al.,* (2006) ont noté deux phases de changement de la teneur en sucre soluble des fruits frais dont une pendant le développement et l'autre après l'atteinte de la maturité. Des résultats différents ont été observés par Wongmetha *et al.,* (2015). D'après ces auteurs, les sucres solubles totaux (TSS) ont tendance à diminuer tout au long du développement du fruit. Ils expliquent que cette diminution progressive de la teneur en TSS de la mangue au cours du développement du fruit est due à une diminution de la quantité de glucides et de pectines, de l'hydrolyse partielle des protéines et de la décomposition des glycosides en sous-unités pendant la respiration.

Le pH de la mangue a en début de maturation tendance à ne pas beaucoup évoluer (1er jour au 28ème jour ; Figure 26). A partir du 35ème jour jusqu'au 77ème jour, le pH augmente progressivement lorsque la mangue tend vers la phase de maturation complète. Lorsqu'on s'intéresse au pH moyen des mangues récoltées à différentes dates d'échantillonnages, on

constate une différence significative (F= 779.72, p-value< 0,001***). Le test HSD révèle qu'il n'y a pas de différence significative entre le pH moyen des mangues récoltées au 14ème et 21ème jour ni entre le pH moyen des mangues récoltées au 55ème et au 62ème jour. Au 76ème jour, on observe un pH moyen plus élevé et significativement différent des pH moyens des mangues récoltées les autres dates d'échantillonnages.

L'évolution du pH des mangues observée dans cette étude est en accord avec les travaux de Medlicott *et al.,* (1986). Un même pattern de l'évolution du pH des mangues a été observé par Delroise, (2003); Abu, (2010) qui observent une évolution progressive du pH au cours de la maturation de la mangue et expliquent qu'il y a une différence entre le pH des mangues à fort apport carbonés et celui des mangues à faibles apports carbones.

L'acidité titrable de la mangue augmente au début de la croissance de la mangue (1er au 14ème jours ; Figure 26) avant de diminuer progressivement au cours de la maturation (14ème au 77ème jours) de la mangue. Les mangues non mûres seront donc beaucoup plus acides que les mangues mûres. La teneur moyenne en acide des mangues récoltées à différentes dates est significativement différente (F= 106.63, p-value< 0,001***). Le test HSD révèle qu'il n'y a pas de différence significative entre les teneurs en acide moyenne des mangues récoltées au 1er et 28ème jour ni entre celles récoltées aux 22ème, 35ème et 42ème jour. Le même constat est fait pour la teneur moyenne en acide des mangues récoltées au 14ème et 55ème. Les mangues récoltées au 62ème jour présentent une teneur en acide moyenne plus faible comparé à toutes les autres dates et cette différence est significative.

Dans notre étude, l'acidité titrable des mangues augmente au début avec la croissance de la mangue avant de diminuer progressivement au cours de la maturation. Dans les travaux de Wongmetha *et al.*, (2015), l'acidité titrable (TA) augmente pendant la phase initiale de croissance et diminue ensuite pendant la maturité. Léchaudel et Joas, (2006) rapportent que l'acidité titrable diminue avec la date de récolte. Cette variation de l'acidité titrable était liée à une diminution de l'acide citrique, l'acide prédominant dans la mangue. Ce schéma de variation de l'acidité titrable a été observé dans de nombreuses variétés cultivées en Inde et aux Antilles (Subramanyam *et al.*, 1975).

En résumé, les mangues récoltées en début de saison auraient une TSS et un pH plus faible mais une TA plus élevée.

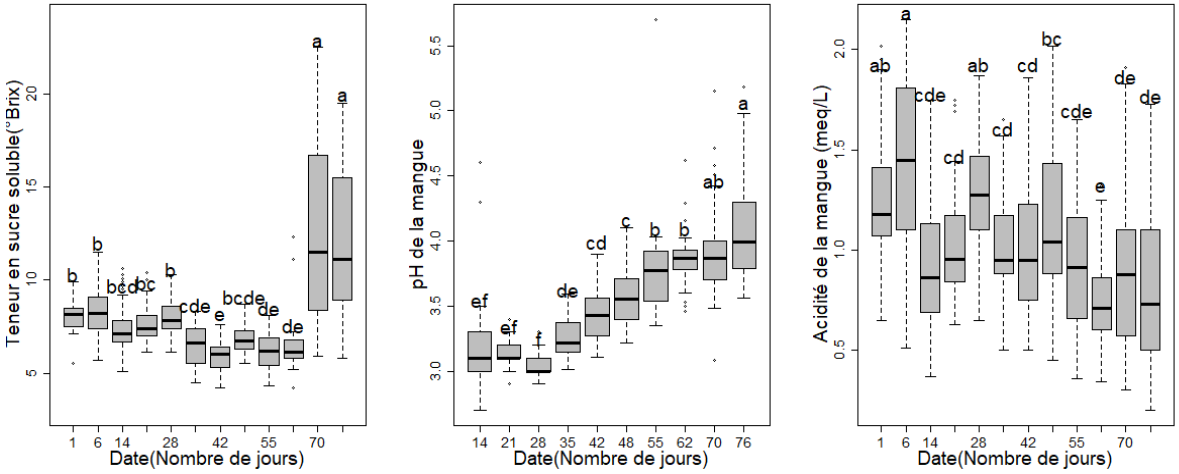


Figure 26: Représentation de l'évolution des paramètres physicochimiques de la mangue au cours du temps

3.3 Relation entre les paramètres morphologiques de la mangue

La relation entre les paramètres morphologiques a été mise en évidence à travers des tests de corrélation de Spearman. Le poids des mangues est très fortement corrélé à la longueur (R=0,88), la grande (R=0,92) et la petite largeur (R=0,86) et le périmètre (R=0,94) de la mangue (Figure 27). La longueur est très fortement corrélée à la grande largeur (R=0,82), à la petite largeur (R=0,64) et au périmètre (R=0,82) de la mangue. Il en est de même pour la grande largeur qui est très fortement corrélée à la petite largeur (R=0,81) et au périmètre (R=0,92) de la mangue. La petite largeur est quant à elle très fortement corrélée au périmètre (R=0,84) de la mangue. La lecture de la matrice de corrélation nous révèle que les paramètres morphologiques de la mangue présentent une forte corrélation positive entre eux. Il existe donc une relation entre ces paramètres et la croissance des mangues.

Des résultats similaires ont été trouvés par Passannet et Aghofack-Nguemezi, (2018). Ces auteurs ont trouvé une corrélation positive très forte (0,9 > r > 0,99) entre la masse, le volume, la circonférence, la masse de la peau, le diamètre latéral, l'épaisseur et l'indice de calibre de la mangue. Diatta, (2018) rapportent qu'il existe une relation linéaire et non affectée par les conditions de croissance entre le poids frais des mangues de la variété 'Kent' et les paramètres morphologiques tels que la longueur et le diamètre.

3.4 Relation entre les paramètres physicochimiques de la mangue

Les paramètres physicochimiques sont également corrélés entre eux avec des niveaux de significativité différents (Figure 27). L'acidité titrable de la mangue présente une corrélation négative forte (R=-0,54) avec le pH de la mangue et très faible avec la teneur en sucre soluble

(R=0,1). Par contre, le pH de la mangue est corrélé positivement à la teneur en sucre soluble bien que cette corrélation soit faible (R=0,073). Ces résultats pourraient expliquer que la diminution de l'acidité de la mangue est suivie d'une augmentation du pH et également de la teneur en sucre soluble. Autrement dit, une mangue mature aurait une acidité faible, un pH élevé et une teneur en sucre soluble plus importante.

Ces résultats sont conformes aux résultats de Briot, (1999) qui estiment que la TSS ainsi que le pH augmentent significativement avec l'âge ce qui n'est pas le cas pour le taux d'acidité. Par contre, les travaux de Kagy, (2010) montrent qu'il y a une corrélation positive entre la teneur en sucre soluble et l'acidité titrable. Medlicott *et al.*, (1986) démontrent que la teneur en TSS est plus élevée et le TA plus faible chez les mangues aux stades de maturité avancés. Cette divergence de résultats peut avoir plusieurs explications. Génard *et al.*, (2007) ont trouvé que les conditions de croissance du fruit affectent sa qualité et sa maturité en faisant varier ses bilans énergétique, carboné et hydrique. Aussi, d'après les travaux de Lechaudel *et al.*, (2012) sur le manguier, un fruit à l'extérieur de la canopée recevrait 6 à 10 fois plus d'énergie lumineuse qu'un fruit positionné à l'intérieur de l'arbre.

3.5 Relation entre les paramètres morphologiques de la mangue et les paramètres physicochimiques de la mangue

En nous référant à la matrice de corrélation (Figure 27), on observe une corrélation négative entre la teneur en sucre soluble et les paramètres morphologiques de la mangue. Cette corrélation négative de la teneur en sucre soluble est forte avec la longueur (R=-0,46) et la grande largeur (R=-0,43) de la mangue. La teneur en sucre soluble est moins corrélée aux autres paramètres morphologiques tels que le poids (R=-0,37), la petite largeur (R=-0,22), et le périmètre (R=-0,35). Ces coefficients de corrélation expliquent que l'augmentation des paramètres morphologiques de la mangue est suivie d'une diminution de la teneur en sucre soluble de la mangue. D'après la revue de la littérature, l'augmentation de la taille de la mangue est corrélée positivement à l'augmentation de la teneur en sucre. Mais cela est contraire à aux résultats de notre étude. A partir de nos résultats, on pourrait dire que la taille de la mangue ne conditionne pas la teneur en sucre de la mangue. En effet, une mangue de petite taille peut être plus sucrée qu'une mangue de grande taille. Ceci dépend des ressources mises à la disposition du manguier sinon du ratio feuille/fruit ou de bien d'autres paramètres pouvant expliquer cette corrélation. La forte sensibilité de la teneur en sucre aux conditions de culture et à l'environnement pourrait justifier ce résultat.

Le pH de la mangue, contrairement à la teneur en sucre soluble présente une corrélation positive avec les paramètres morphologiques. Il est fortement corrélé à la petite largeur (R=0,58), faiblement corrélé au poids (R=0,36), à la grande largeur (R=0,33) et au périmètre (R=0,37) mais très faiblement corrélé à la longueur (R=0,12).

Ces résultats montrent que le pH augmente avec les paramètres morphologiques de la mangue. Une mangue de grande taille présenterait un pH plus élevé et donc la mangue serait moins acide.

L'acidité de la mangue est corrélée négativement aux paramètres morphologiques de la mangue. Elle est très faiblement corrélée au poids (R=0,25), à la longueur (R=0,18), à la grande largeur (R=0,21), à la petite largeur (R=0,26) et au périmètre (R=0,26).

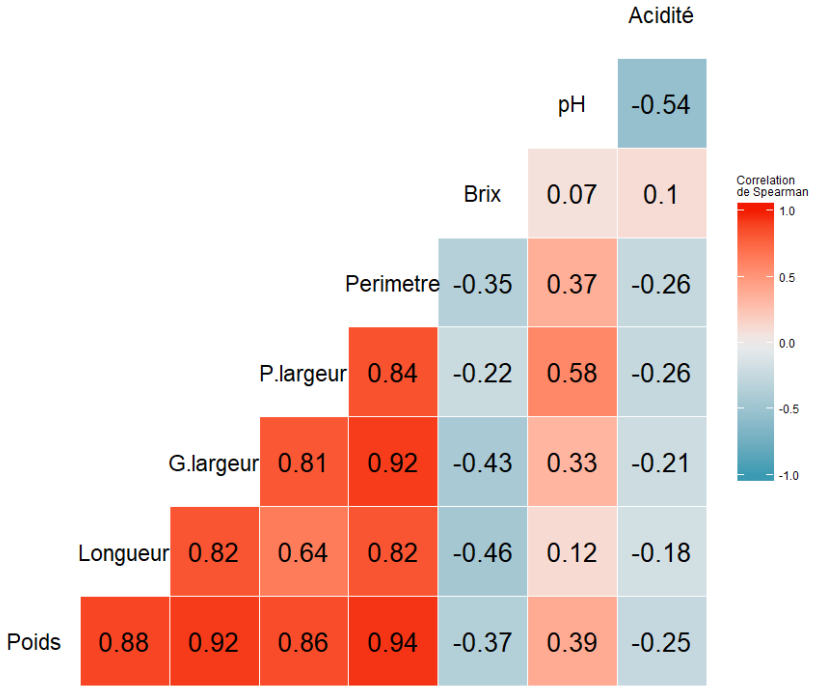


Figure 27: Matrice de corrélation de Spearman entre les paramètres morphologiques et physicochimiques mesurés sur les mangues

Pour mieux appréhender la relation entre les paramètres physicochimiques et les paramètres morphologiques de la mangue, des régressions linéaires simples ont été faites afin d'estimer et tester la significativité du coefficient de corrélation linéaire simple. De l'analyse de ces régressions linéaires il se dégage qu'il y a une corrélation négative très significative entre la teneur en sucre soluble et les paramètres morphologiques ($R<0,5$; p-value$<0,001$; Figure 28). Par contre, on observe une corrélation positive très significative entre le pH et les paramètres morphologiques ($R<0,5$ pour le poids, la grande largeur et le périmètre). La petite largeur quant à elle présente une corrélation positive très significative et plus forte avec le pH de la mangue ($R>0,5$; p-value$<0,001$; Figure 29). Enfin, on observe une corrélation négative très significative entre l'acidité et les paramètres morphologiques ($R<0,5$; p-value$<0,001$;

Figure 30). Plus tard on mettra en évidence l'évolution de ces paramètres en fonction du niveau de maturité de la mangue.

La corrélation entre le pH de la mangue et l'acidité de la mangue est négative et très significative (R=-0,54 ; p-value<0,001 ; Figure 31). Une allure similaire de l'acidité est observée avec la teneur en sucre soluble. On observe une corrélation négative significative entre l'acidité de la mangue et la teneur en sucre soluble (R=0,1 ; p-value<0,05). Le pH de la mangue présente une corrélation positive non significative avec l'acidité de la mangue (R=0,073 ; p-value=0,11).

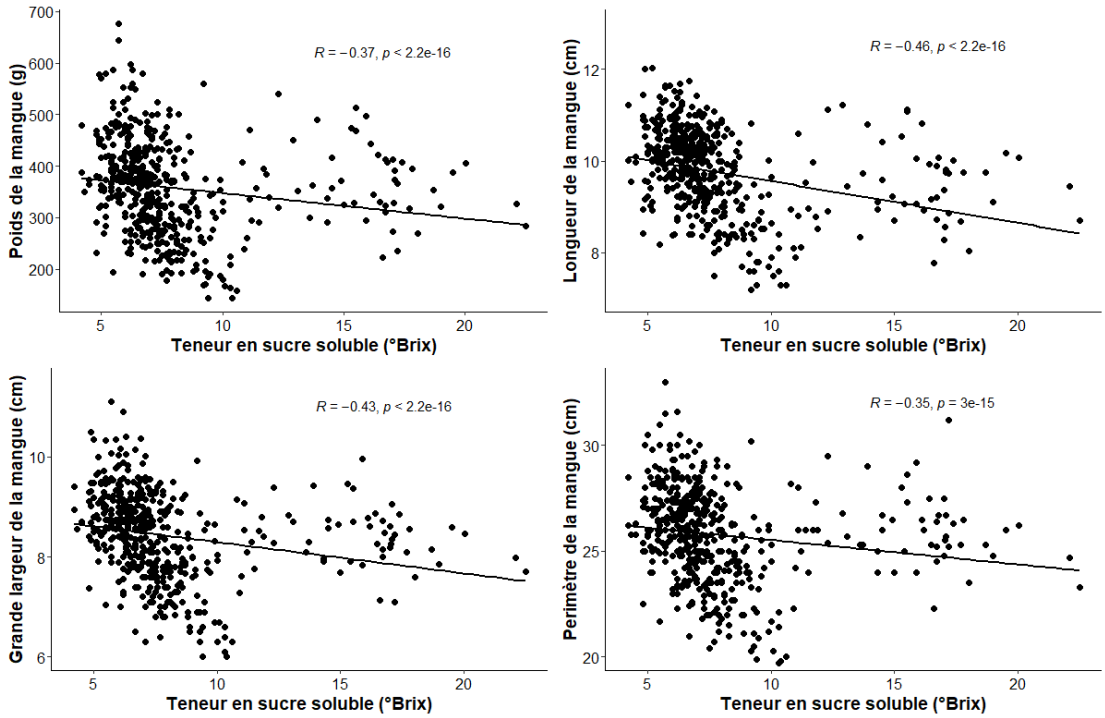


Figure 28: Représentation de la corrélation entre les paramètres morphologiques de la mangue et la teneur en sucre soluble.

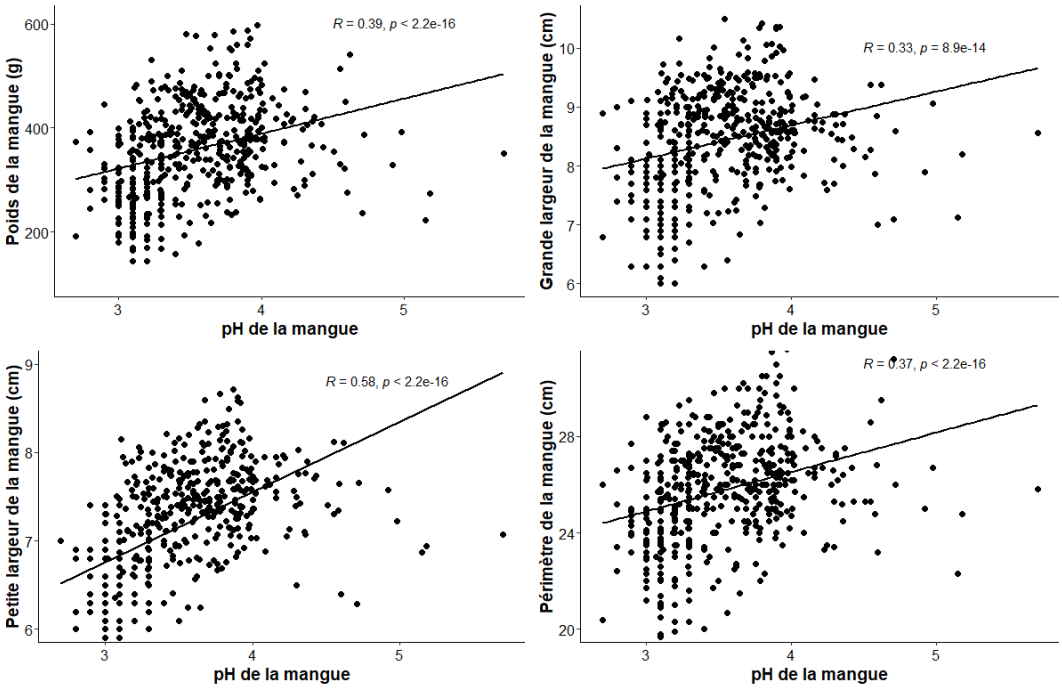


Figure 29: Représentation de la corrélation entre les paramètres morphologiques de la mangue et le pH.

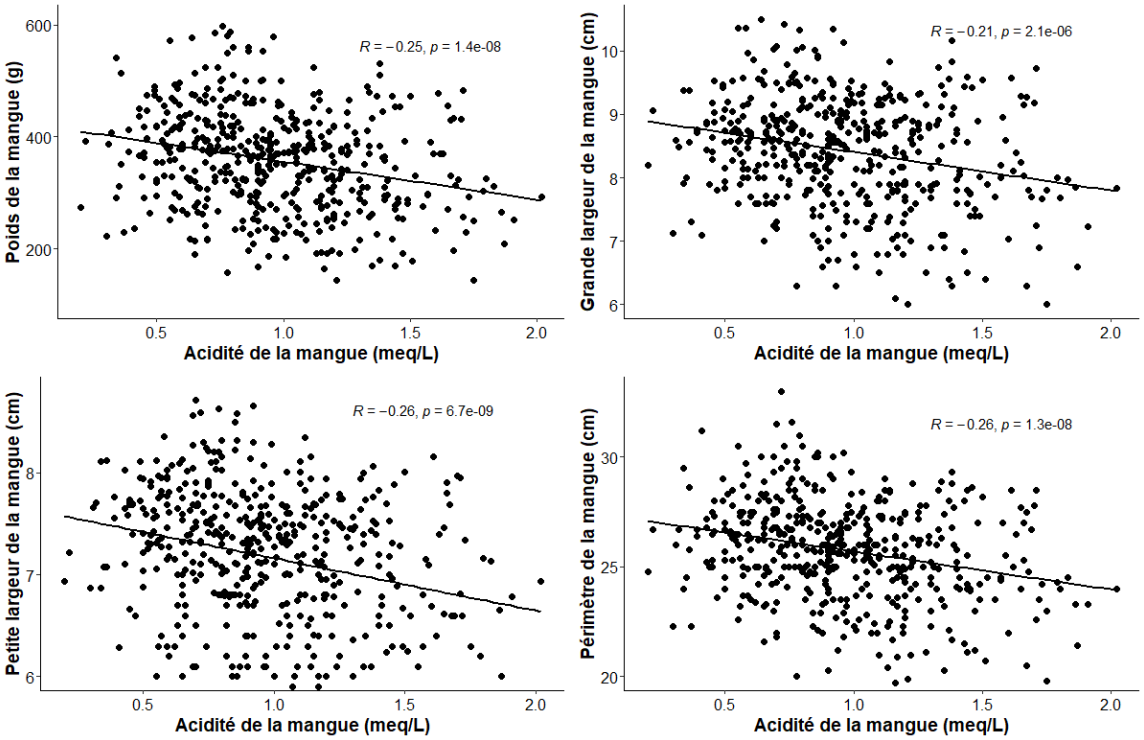


Figure 30: Représentation de la corrélation entre les paramètres morphologiques de la mangue et l'acidité titrable.

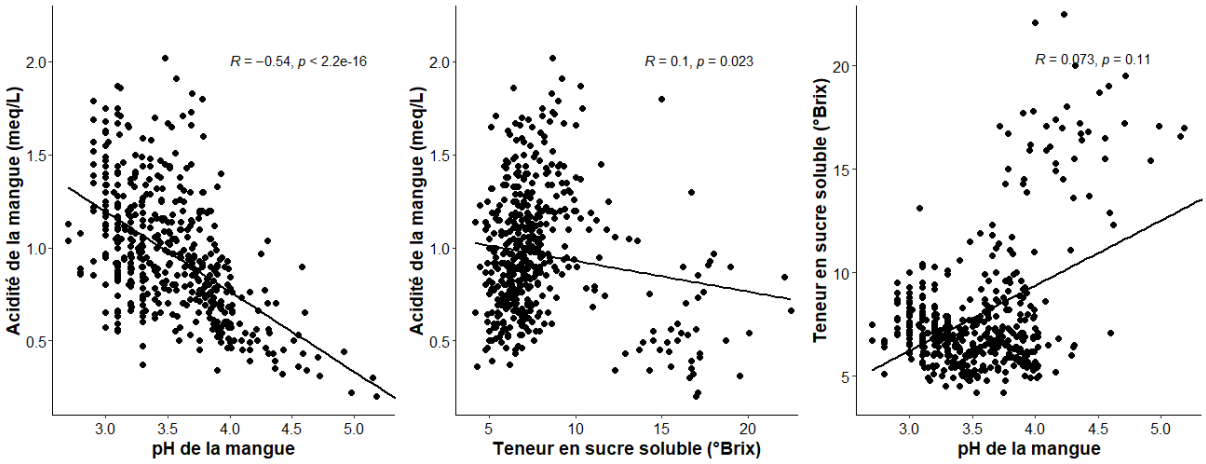


Figure 31**:** Représentation de la corrélation entre les paramètres physicochimiques

3.6 Evolution du niveau de maturité des mangues en fonction du temps

On rappelle que les niveaux de maturité ont été attribués aux mangues par examen de la couleur de la pulpe. A partir de cette classification, les courbes ont été tracées afin de mettre en évidence l'évolution du niveau de maturité des mangues dans le temps en considérant la couleur de la pulpe comme indicateur du niveau de maturité. Ces courbes (Figure 32) montrent parfaitement comment évolue la maturité dans le temps. En effet, les mangues récoltées courant les mois de mai-juin sont majoritairement de niveau de maturité M1 et M2 avec des pics en début du mois de mai pour les mangues de niveau de maturité M1 et en fin du mois de juin pour les mangues de niveau de maturité M2. Elles deviennent moins présentes voire quasi absentes en début du mois de juillet. Pendant ce temps, à partir de la mi-juin on rencontre plus de mangues de niveau de maturité M3 prenant ainsi le relais avec un pic en début du mois de juillet. Les mangues les plus matures de niveau M4 et M5 commencent à apparaître en début du mois de juillet pendant que celle de niveau M3 se raréfient. La majorité des mangues matures se retrouvent courant le mois de juillet.

Ces résultats confirment que la maturité des mangues évolue dans le temps et qu'il ya un chevauchement entre les différents niveaux de maturité des mangues. Une mangue récoltée courant le mois de juillet à une grande probabilité d'être de niveau de maturité M4 ou M5. Cela n'écarte pas l'hypothèse de retrouver des mangues de niveau de maturité M3 courant le mois de juillet même s'il y a de fortes chances qu'elles soient en nombre réduit.

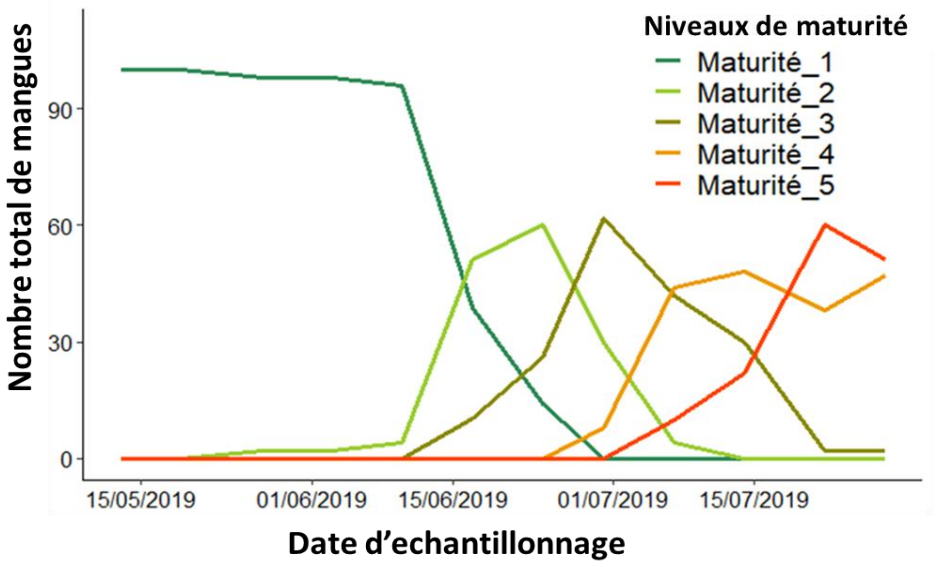


Figure 32**:** Représentation du niveau de maturité des mangues en fonction du temps

3.7 Effet des paramètres morphologiques sur la maturité

Les ANOVAs réalisés rapportent qu'il y a une différence significative (F=98.3 ; p-value < 0 ,001 ***) entre les poids moyens des mangues de différents niveaux de maturité (M1, M2, M3, M4, M5). Les tests HSD réalisés révèlent qu'il y a une différence significative entre le poids moyen des mangues de niveau de maturité M1 et le poids moyen des mangues des 04 autres niveaux de maturité (M2, M3, M4, M5). Par contre, il n'y a pas de différence significative entre les poids moyens des mangues des niveaux de maturité M2, M3, M4 et M5 (Figure 33). Un résultat similaire est obtenu avec le périmètre moyen, la valeur moyenne de la grande largeur de la mangue et la valeur moyenne de la petite largeur des mangues.

Une différence significative (F= 93.1 ; p < 0,001 ***) a été également notée entre le périmètre moyen des mangues de différents niveaux de maturité. Les tests HSD réalisés révèlent qu'il y a une différence significative entre les périmètres moyens des mangues de niveau de maturité M1 et le périmètre moyen des mangues des 04 autres niveaux de maturité M2, M3, M4 et M5. Il n'y a pas de différence significative entre les périmètres moyens des mangues des niveaux de maturité M2, M3, M4 et M5 (Figure 33)

Il existe une différence significative (F= 81.9 ; p < 0,001 ***) entre la valeur moyenne de la grande largeur des mangues de différents niveaux de maturité. Les test HSD réalisés révèlent qu'il y a une différence significative entre la valeur moyenne de la grande largeur des mangues de niveau de maturité M1 et la valeur moyenne de la grande largeur des mangues des 04 autres niveaux de maturité (M2, M3, M4, M5). Il n'y a pas de différence significative entre

les valeurs moyennes de la grande largeur des mangues des niveaux de maturité M2, M3, M4, M5 (Figure 33)

Par la suite, il a été notée une différence significative (F= 291.4; p-value < 0,001***) entre la valeur moyenne de la petite largeur des mangues de différents niveaux de maturité. Les test HSD réalisés révèlent qu'il y a une différence significative entre la valeur moyenne de la petite largeur des mangues de niveau de maturité M1 et la valeur moyenne de la petite largeur des mangues des 04 autres niveaux de maturité (M2, M3, M4, M5). Il n'y a pas de différence significative entre les valeurs moyennes de la petite largeur des mangues des niveaux de maturité M2, M3, M4, M5 (Figure 33)

On observe par ailleurs, une différence significative (F= 7.7; p-value < 0.005 **) entre les longueurs moyennes des mangues de différents niveaux de maturité. Les test HSD réalisés confirment cette différence significative entre les longueurs moyennes des mangues des 05 niveaux de maturité (Figure 33). La longueur de la mangue quant à elle présente des résultats mettant plus en relief la distinction des niveaux de maturité par les paramètres morphologiques Les travaux de Subramanyam *et al.*, (1975); Delroise, (2003) confirment que les paramètres morphologiques de la mangue évoluent en fonction du niveau de maturité. Des résultats similaires ont été trouvés par Rafalimanana, (2011) en étudiant la relation entre la maturation des fruits et la capacité germinative des graines de *Podocarpus gaussenii.* Ces auteurs ont rapporté que la taille des fruits augmente au cours de la maturation des fruits de six différents niveaux de maturité.

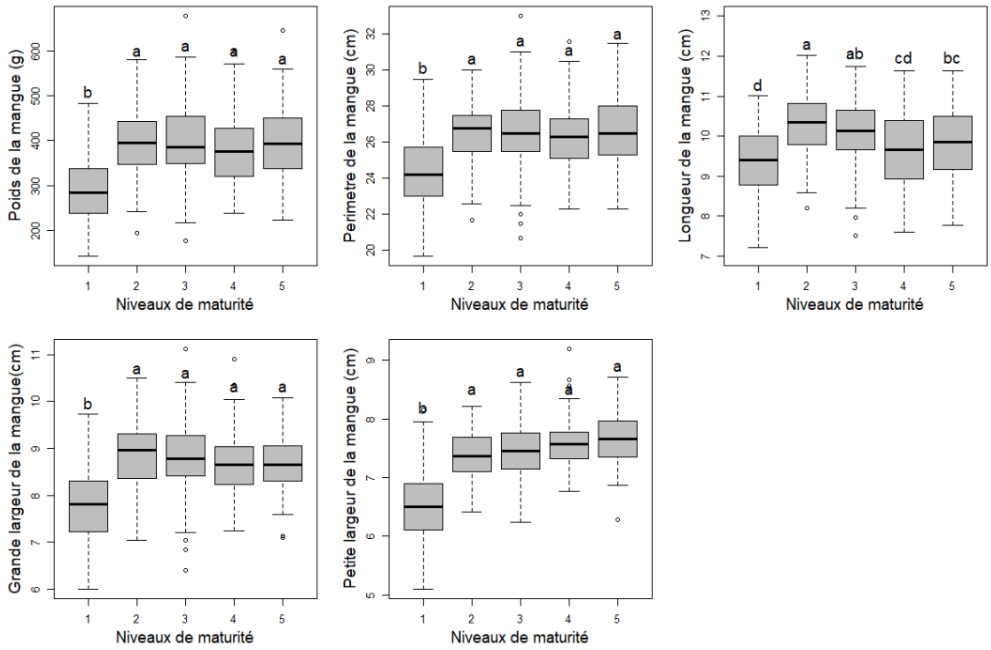


Figure 33**:** Représentation de l'évolution des paramètres morphologiques en fonction du niveau de maturité des mangues

3.8 Effet des paramètres physicochimiques sur la maturité

On note une différence significative (F= 85.7 ; p-value < 0,001***, Figure 34) entre la teneur en sucre soluble moyenne des mangues des 05 niveaux de maturité. Les mangues de niveaux de maturité M2 et M3 ont des teneurs en sucre soluble moyennes faibles comparé aux mangues de niveaux de maturité M4 et M5 qui ont des teneurs en sucre soluble moyennes plus fortes. La teneur en sucre soluble est plus élevée chez les mangues matures que chez les mangues immatures. Les fruits de maturité M5 ont des teneurs en sucre soluble significativement plus élevées.

La teneur en sucre soluble serait donc un indicateur du niveau de maturité des mangues. Néanmoins, son utilisation reste discutable étant donné qu'elle ne permet pas de distinguer les mangues de niveau de maturité M1 des mangues de niveau de maturité M4. De même, la teneur en sucre soluble ne permet pas de distinguer les mangues de niveau de maturité M2 des mangues de niveau de maturité M3. Son utilisation à elle seule dans la détermination des niveaux de maturité des mangues pourrait prêter à confusion d'où l'intérêt d'y associer d'autres paramètres beaucoup plus indicateurs du niveau de maturité.

En ce qui concerne le pH, une différence significative (F= 977 ; p < 0,001***, Figure 34) entre les pH moyens des mangues des 05 niveaux de maturité M1, M2, M3, M4 et M5 a été observée. Le pH des mangues augmente avec le niveau de maturité. Les mangues immatures ont des pH faibles contrairement au mangues matures qui ont des pH nettement plus élevés. Les mangues de maturité M5 ont des pH significativement plus élevés. La détermination du pH pourrait être une bonne approche pour estimer le niveau de maturité des mangues. Ceci grâce à la différence entre les pH moyens des mangues de différents niveaux de maturité.

On observe une différence significative (F= 62.499 ; p < 0,001***, Figure 34) entre les teneurs moyennes en acide des mangues de différents niveaux de maturité M1, M2, M3, M4 et M5. La teneur en acide (TA) des mangues diminue avec le niveau de maturité des mangues. Les mangues immatures ont une TA plus forte que les mangues matures en général. Mais il est important de noter que les mangues de niveaux de maturité M2 et M3 ont des teneurs en acide différentes bien que cette différence ne soit pas significative. Les mangues de maturité M5 ont une TA significativement plus faible. L'acidité titrable des mangues demeure donc un paramètre intéressant pour l'estimation du niveau de maturité des mangues en prérécolte.

Ces résultats sont similaires aux travaux de Delroise, (2003); Léchaudel et Joas, (2006); Abu, (2010) qui soutiennent que le pH et la TSS de la mangue augmentent en fonction du niveau de maturité des mangues contrairement à l'acidité titrable qui diminue. Les travaux de

Rafalimanana, (2011) sur les fruits de *Podocarpus gaussenii*, rapportent une variation du TSS au cours de la maturation des fruits. Le TSS au niveau de la pulpe augmente pendant les 5 premiers niveaux de maturité et diminue chez les mangues du niveau de maturité 6. Ces auteurs ont également noté que l'acidité titrable est assez élevée pour les fruits immatures, c'est-à-dire ceux des premiers niveaux de maturité et est faible pour les fruits des derniers niveaux de maturité.

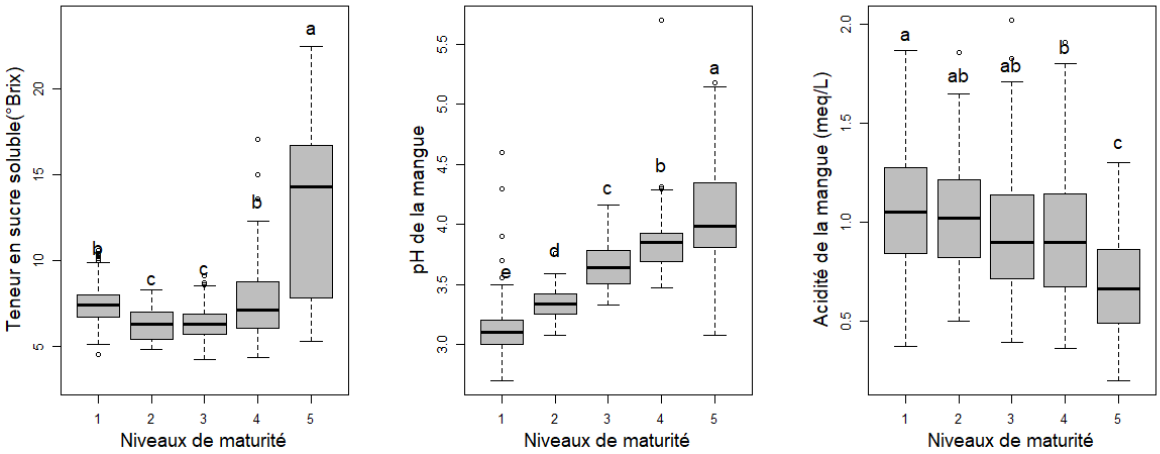


Figure 34**:** Représentation de l'évolution des paramètres physicochimiques en fonction du niveau de maturité des mangues

3.9 Estimation du pH, TA, TSS en fonction des données d'analyse d'images

On s'est proposé d'établir des modèles permettant d'estimer les paramètres physicochimiques de la mangue sur la base des données issues de l'analyse d'image. L'idée est de pouvoir relier les indices de forme et de couleur aux paramètres physicochimiques des mangues mesurées au laboratoire. Les données utilisées issues des images prises sur des mangues en verger et au laboratoire. Par analyse d'images, les images des mangues dont la face a été exposée au soleil ont été distinguées de celles dont la face n'était pas exposée au soleil. Cette analyse d'image a abouti à l'obtention de deux jeux de données. Un premier jeu de données était constitué uniquement d'images des faces des mangues exposées au soleil. L'autre jeu de données quant à lui était constitué d'images des faces des mangues non exposées au soleil.

Ce faisant, 9 modèles d'estimation de paramètres physicochimiques ont été développés. Trois situations dictées par le lieu de prise des images et la face de la mangue dont l'image a été prise ont été considérées. Ces 3 situations ont donné lieu à des modélisations sur la base des images des mangues prises en verger sans distinction de face de la mangue, des images des

mangues dont la face est exposée au soleil et des images des mangues dont la face n'a pas été exposée au soleil. Dans chaque situation trois modèles ont été développés. Chaque modèle correspondait à une estimation de l'un des paramètres physicochimiques qu'étaient la teneur en sucre soluble, le pH et l'acidité de la mangue.

3.9.1 Modélisations pour l'estimation de la teneur en sucre soluble

Trois modèles ont été développés pour l'estimation de la teneur en sucre soluble. Parmi ces 3 modèles, le modèle basé sur les images prises en verger, est celui qui donne une meilleure estimation (R^2=0,31) comparé aux autres modèles, qui donnent une estimation moins fiable (R^2=0,14 ; Tableau 4). Les différences entre les valeurs prédites par ce modèle et les valeurs observées sont faibles (RMSE<15% ; Root-Mean-Square Error : l'erreur quadratique moyenne mesurant la différence entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs observés). Ce modèle arrive à faire une prédiction satisfaisante de la teneur en sucre des mangues dans 85% des cas. Les variables sélectionnées dans la construction du modèle sont par ordre d'importance la couleur rouge R, suivie de l'axe majeur des mangues et du périmètre. La couleur rouge R de la peau apparaît comme étant corrélée à la variation de la teneur en sucre soluble. L'exposition des mangues au soleil n'a pas d'effet significatif sur la teneur en sucre des mangues.

Dans la littérature, peu d'études ont été réalisées sur l'estimation de la teneur en sucre soluble des mangues pour l'évaluation des niveaux de maturité à partir des mesures des indices de couleur RVB. La plupart des travaux menés sur l'estimation de la TSS ont été effectués sur la base des techniques de spectroscopie proche infrarouge, de l'imagerie hyperspectrale ou de la télédétection.

Nordey *et al.,* (2019) ont trouvé des relations faibles (r^2<0,41, RMSEV=1,1%) entre la teneur en sucre soluble des mangues mesurée à la récolte et après la maturation à l'aide de la spectroscopie dans le proche infrarouge. Polinar *et al.,* (2019) préconisent qu'il est possible d'aboutir à une prédiction du TSS (R2 = 0,839, RMSECV = 1,282) des fruits mûrs en utilisant les spectres NIR au stade de la maturité de table. Par ailleurs, des modèles de régression linéaire ont été développés par Jha *et al.,* (2006, 2007) pour prédire la TSS à la récolte en utilisant les valeurs a* et b* de Hunter (r2=0,83) ou en utilisant les valeurs de réflectance entre 440 et 480 nm (la partie bleue du spectre visible, r2=0,8). Les modèles développés par Assoi *et al* (2019) à partir de la spectroscopie par télédétection, prédisent avec une grande précision (R^2=0,93, RPD= 3,8, Relative percent difference) le TSS des mangues.

Les indices de forme pris en compte dans le modèle d'estimation de la TSS dans notre étude n'ont pas été cités dans la littérature pour l'estimation de ce paramètre de qualité de la mangue d'après nos recherches. Néanmoins, ils sont très souvent utilisés pour l'estimation de la taille des mangues ou la classification des mangues en différents niveaux de maturité par analyses d'images. Momin *et al.,* (2017) ont utilisé le périmètre extrait des images de mangue RVB converties en HSI pour classer les mangues en différents niveaux de maturité avec une précision de 79%. En addition au périmètre qui s'est montré efficace, Fmim *et al.*, (2017) ont utilisé d'autres descripteurs de forme tels que la surface, la longueur, la largeur, etc. pour discriminer les variétés d'olives françaises à partir d'images RVB.

Tableau 4 : Modèles linéaires multiples obtenus pour la variable **log(TSS)** dans les trois situations verger, laboratoire avec la face de la mangue exposée et laboratoire avec la face de la mangue non exposée au soleil. Niveaux de significativité * p-value <0.05; ** p-value < 0.01; *** p-value < 0.001.

Situation	**Variables**	**Coefficient**	**Erreur Std.**	**Pr(> |t|)**
Verger	(Intercept)	4,38	0,89	<0,001***
	Surface de la mangue	0,03	9,48E-03	0,001**
	Périmètre de la mangue	0,02	8,79E-03	0,012*
	Axe majeur de la mangue	-0,23	0,08	0,003**
	Axe mineur de la mangue	-0,45	0,1	<0,001***
	Couleur Rouge de la peau	7,05E-03	5,97E-04	<0,001***
	R^2	**0,31**		
	RMSE	0,26		
	RMSE(%)	**12,76**		
Labo_exposée	(Intercept)	1,85	0,18	<0,001***
	Axe majeur de la mangue	-0,04	8,94E-03	<0,001***
	Couleur Rouge de la peau	4,09E-03	7,90E-04	<0,001***
	R^2	**0,14**		
	RMSE	0,24		
	RMSE(%)	**12,21**		
Labo_non exposée	(Intercept)	1,83	0,18	<0,001***
	Périmètre de la mangue	-0,01	2,71E-03	<0,001***
	Couleur Rouge de la peau	3,98E-03	7,94E-04	<0,001***
	R^2	**0,14**		
	RMSE	0,24		
	RMSE(%)	**12,21**		

3.9.2 Modélisations pour l'estimation du pH

Trois autres modèles ont été développés afin d'estimer le pH des mangues. Les modèles basés sur les images des mangues prises au laboratoire, qu'elles soient de face exposée ou non au soleil, donnent des estimations plus intéressantes du pH (R^2= 0,44 ; R^2= 0,43) comparés au modèle basé sur les images prises en verger qui donne une estimation plus faible (R^2= 0,34 ;

Tableau 5). Les deux modèles d'estimations du pH à partir des images prises au laboratoire sont similaires. Ceci suggère que l'exposition des mangues au soleil n'a pas d'effet significatif sur le pH de la mangue. Les différences entre les valeurs prédites par les 3 modèles et les valeurs observées sont faibles (RMSE<10%). Dans 90% des cas, ces modèles arrivent à faire une bonne prédiction du pH des mangues.

Les variables sélectionnées dans la construction de ces modèles sont le périmètre, l'axe majeur, l'axe mineur, la circularité, l'asymétrie, la couleur rouge, bleue, l'intensité moyenne des couleurs RVB, le niveau de couleur gris, la luminosité L*ou B, et le ratio (Vert/Rouge) a* de la peau de la mangue. Les deux modèles d'estimation du pH dans les situations où on a considéré les images prises au laboratoire (faces exposées au soleil ou non) ont tendances à surtout prendre en compte la luminosité (L*ou B) de la peau de la mangue. Tandis que le modèle basé sur les images prises en verger prend plutôt en compte les variables de couleur rouge, bleue et l'intensité moyenne des couleurs de la peau (R, B et RVB). Les modèles avec le pH sont meilleurs et plus robustes que les modèles avec la teneur en sucre soluble.

Les études qui tentent d'estimer le pH à partir des indices de couleur RVB sont rares. Cependant, les modèles développés par (Assoi *et al.*, 2019) à partir de la spectroscopie par télégestion, prédisent avec une précision moyenne acceptable (R^2=0,77, RPD=2,14, Relative percent difference) le pH des mangues. On retrouve aussi des travaux qui prennent en compte le pH comme indice permettant la classification des mangues à l'aide de techniques d'imagerie hyperspectrale dans le proche infrarouge.

Les indices de forme pris en compte dans le modèle d'estimation du pH de la mangue n'ont pas été cités dans la littérature pour l'estimation de ce paramètre de qualité de la mangue d'après nos recherches. Néanmoins, les études de Momin *et al.*, (2017) et de
Fmim *et al.*, (2017) ont prouvé l'utilisation de ces descripteurs de formes notamment le périmètre, l'axe mineur, l'axe majeur pour la classification des mangues en des stades de maturité ou de la discrimination des variétés d'olives. Surya Prabha et Satheesh Kumar, (2015) ont également exploré les caractéristiques de la couleur (couleur moyenne de l'histogramme) et de la valeur de la taille (la surface, le périmètre, la longueur du grand axe et la longueur du petit axe) des images RVB de fruits de banane frais pour classer les catégories sous-mature, mature et sur-mature. Les indices de couleur rouge R, bleue B d'intensité moyenne des couleurs de la peau qui ressortent dans le modèle d'estimation de pH à partir d'images ont également été rapportés dans la littérature comme étant des indices permettant la classification des fruits. Pareillement, Nandi *et al.*, (2012) ont développé un prototype de système automatique de classification et de tri des mangues en fonction des niveaux de maturité à partir des

caractéristiques pertinentes qui sont sensibles au niveau de maturité de la mangue comme la valeur moyenne de R, V et B de la mangue entière.

On note aussi dans nos modèles d'estimation du pH, les indices de couleur L* et a* de Hunter. Dans la littérature, peu de travaux ont été réalisées sur l'estimation de pH de la mangue à partir de ces indices de couleur. Toutefois, Zhuang *et al.*, (2019) ont noté des différences significatives entre quatre stades de maturité des bananes grâce à la composante a* dans l'espace de couleur CIE L*a*b* ce qui a permis d'obtenir une excellente précision. Ceci pourrait expliquer la meilleure prédiction de la teneur en pH faite par notre modèle qui prend en compte ces indices de couleur.

Tableau 5 : Modèles linéaires multiples obtenus pour la variable **pH** dans les trois situations verger, laboratoire avec la face de la mangue exposée et laboratoire avec la face de la mangue non exposée au soleil. Niveaux de significativité * p-value <0.05; ** p-value < 0.01; *** p-value < 0.001.

Situation	Variables	Coefficient	Erreur Std.	Pr(> |t|)
Verger	(Intercept)	2,85	0,22	<0,001***
	Couleur Rouge de la peau (R)	-0,32	4,00E-02	<0,001***
	Couleur Bleue de la peau (B)	-0,24	3,00E-02	<0,001***
	Couleur RVB de la peau	0,56	0,07	<0,001***
	a*(Vert/Rouge) de la mangue	0,36	0,04	<0,001***
	R^2	**0,35**		
	RMSE	0,34		
	RMSE(%)	**9,61**		
Labo_exposée	(Intercept)	-0,74	2,15	0,729
	Niveau de couleur gris de la peau	-0,02	2,37E-03	0,027*
	Périmètre de la mangue	0,22	0,1	0,038*
	Axe majeur de la mangue	-0,32	0,15	0,029*
	Axe mineur de la mangue	0,42	0,19	0,033*
	Circularité	5,50	2,57	<0,001***
	Asymétrie	-0,22	0,06	<0,001***
	Luminosité (L*) de la peau	0,03	6,89E-03	<0,001***
	a*(Vert/Rouge) de la mangue	0,01	1,80E-03	<0,001***
	R^2	**0,44**		
	RMSE	0,28		
	RMSE(%)	**8,02**		
Labo non exposée	(Intercept)	-1,75	2,13	0,412
	Niveau de couleur gris de la peau	-0,12	2,02E-03	<0,001***
	Périmètre de la mangue	0,28	0,09	0,003**
	Axe majeur de la mangue	-0,42	0,15	0,004**
	Axe mineur de la mangue	-0,5	0,19	0,008**
	Circularité	6,64	2,53	0,009**
	Asymétrie	-0,21	0,05	<0,001***
	Luminosité (B) de la peau	0,01	1,74E-03	<0,001***

R^2	**0,43**
RMSE	0,28
RMSE(%)	**8,02**

3.9.3 Modélisations pour l'estimation de la teneur en acide (TA)

Les modèles d'estimation de la teneur en acide sont basés sur les images des mangues prises qu'elles soient de face exposée ou non au soleil ou qu'elles soient prises en verger donnent des estimations peu satisfaisantes de l'acidité titrable de la mangue (R^2=0,06; R^2=0,07et R^2= 0,06 ; Tableau 6). On n'observe pas une grande différence entre les estimations de la TA de la mangue dans les différentes situations considérées. Les différences entre les valeurs prédites par les 3 modèles et les valeurs observées sont fortes (RMSE>30%). Les prédictions faites par ces modèles sont très peu satisfaisantes. Les variables sélectionnées dans la construction de ces modèles sont surtout le périmètre, l'axe majeur, l'axe mineur de la mangue, la circularité, la couleur, le ratio (Vert/Rouge) a* de la peau de la mangue.

Tout comme les autres paramètres de qualité, il n'est pas aisé de trouver dans la littérature, des études portant sur l'estimation de l'acidité titrable des mangues à partir des images RVB. Les indices de formes pris en compte dans notre modèle ont, comme on l'a mentionné été utilisé pour des classifications de niveaux de maturité. Nordey *et al.,* (2019) ont trouvé des relations faibles (r^2<0,41, RMSEV=1,1%) entre l'acidité titrable des mangues, mesurée à la récolte et après la maturation à l'aide la spectroscopie proche infrarouge.

Des études récentes sur la mangue 'Namdokmai' ont identifié les acides titrables (AT) et la valeur de la teinte de la pulpe du fruit comme les attributs les plus décisifs spécifiant la maturité de la récolte, tandis que les solides solubles totaux (TSS) et la teneur en matière sèche étaient considérés comme des critères de maturité secondaires (Kienzle *et al.,* 2012). L'indice de couleur a* a été reporté dans les travaux de Eyarkai Nambi *et al.,* (2017) comme étant une variable de couleur indispensable en complément des indices de couleur L* et b* et deux variables (solides solubles totaux et acidité) pour l'obtention d'une meilleure prédiction du stade de maturation de trois cultivars de mangue indiens.

Tableau 6 : Modèles linéaires multiples obtenus pour la variable **TA** dans les trois situations verger, laboratoire avec la face de la mangue exposée et laboratoire avec la face de la mangue non exposée au soleil. Niveaux de significativité * p-value <0.05; ** p-value < 0.01; *** p-value < 0.001.

Situation	Variables	Coefficient	Erreur Std.	Pr(> |t|)
Verger	(Intercept)	1,48	0,14	<0,001***
	Perimètre	-0,01	3,79E-03	<0,001***
	a*(Vert/Rouge) de la peau	-6,86E-03	1,57E-03	<0,001***
	R^2	**0,06**		
	RMSE	0,33		
	RMSE(%)	**34,21**		
Labo_exposée	(Intercept)	1,63	0,15	<0,001***
	Axe majeur de la mangue	-0,05	-4,47	<0,001***
	R^2	**0,06**		
	RMSE	0,31		
	RMSE(%)	**31,80**		
Labo_non exposée	(Intercept)	8,27	2,22	<0,001***
	Perimètre	-0,29	0,1	0,003**
	Axe majeur de la mangue	0,35	0,15	0,019*
	Axe mineur de la mangue	0,6	0,19	0,002**
	Circularité	-7,98	2,65	0,003**
	R^2	**0,07**		
	RMSE	0,3		
	RMSE(%)	**30,78**		

3.10 Détection des piqûres de mouches des fruits

Les piqûres de mouches ont été manuellement comptées sur les images des mangues. De ces analyses d'images, il a été identifié des piqûres sur une cinquantaine de mangues pour un total de 598 mangues récoltées. Courant les mois de mai et de juin, moins de 5% des mangues récoltées présentaient des piqûres de mouches des fruits. Par contre, en juillet, environ 18% des mangues récoltées étaient piquées par des mouches des fruits. La variation du niveau d'infestation au cours du temps (Figure 35) perçue à partir d'analyse d'images est conforme à d'autres travaux basés sur des comptages de mouches des fruits capturées par piégeage ou par comptage des larves issues de mangues incubées (Vayssières *et al.*, 2005; Ndiaye *et al.*, 2015; Konta *et al.*, 2016; Preterre, 2017). La fréquence de piqûres de mouches des fruits pourrait se

justifier par les pluies enregistrées en fin du mois de juin et en juillet dans le verger mais aussi par la disponibilité en ressources pour les mouches.

Les travaux de recherche réalisés dans la même région d'étude par (Ndiaye *et al.*, 2015) rapportent aussi des pics de populations de mouches des fruits suite aux épisodes pluvieux enregistrés dans les vergers. Konta *et al.*, (2016) ont trouvé qu'il existe une relation étroite entre les facteurs climatiques notamment la température, la pluviométrie, l'hygrométrie et les captures dans l'espace et dans le temps à l'exception du vent. La fréquence de piqûres de mouches des fruits pourrait aussi varier en fonction du niveau de maturité (Preterre, 2017).

Nos résultats suggèrent qu'il est possible de compter le nombre de piqûres de mangue par analyse d'image et estimer le taux d'infestation des mangues (Figure 35, Tableau 7)). Certaines études ne portant pas essentiellement sur l'analyse d'images RVB ont trouvé qu'il était possible de détecter des dommages causés par les insectes sur les fruits. Saranwong *et al.*, (2010) ont utilisé la spectroscopie proche infrarouge (NIR) pour la détection non destructive des œufs et des larves de mouches des fruits dans des fruits intacts. La meilleure classification a été obtenue en utilisant des spectres de mangues vertes obtenus 48h après l'infestation, avec un taux d'erreur de 4,2% (deux sur 48) pour les fruits infestés et 0% pour les 48 fruits témoins. Wang *et al.*, (2013) ont proposé une méthode pour compter les insectes d'*Aphidoideas* sur les feuilles des plantes en utilisant un téléphone Android 2.0 pour la capture d'images RVB capturées dans l'environnement naturel avec une précision de 91,52 à 96,61 %. Wang *et al.*, (2011) ont développé un système d'imagerie hyperspectrale qui leur a permis reconnaitre correctement plus de 98 % des jujubes intacts et 94 % des jujubes infestés par des insectes. Moscetti *et al.*, (2014) ont utilisé la spectroscopie NIR pour détecter les dommages cachés causés par les insectes dans les châtaigniers avec un taux d'erreur de 16,8 % de faux négatifs, 0,0 % de faux positifs et 8,4 % au total.

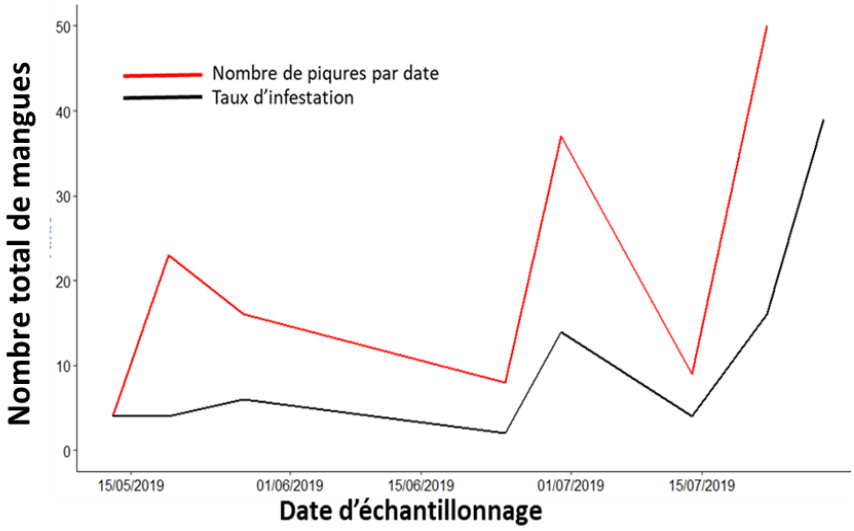


Figure 35: Représentation de l'évolution du nombre de piqûres de mouches et de la fréquence des piqûres en fonction du temps

3.11 Identification des espèces de mouches des fruits

Apres incubation des mangues, les pupes ont été récupéré et les mouches émergées ont été identifiées. Les résultats des identifications de mouches ont révélé que les mouches ayant piquées les mangues étaient exclusivement des *Bactrocera dorsalis*. C'est une espèce présente dans des vergers de différentes variétés de mangues quels que soient l'état du fruit, sa couleur, la vague de floraison et l'endroit de collecte. Cette espèce identifiée à partir des émergences des larves issues de mangues récoltées sur l'arbre a été également identifiée à partir des fruits récoltés sur l'arbre dans les travaux de Ndiaye *et al.*, (2012). Vayssières *et al.*, (2005) ont constaté qu'à partir de la mi-mai, cette espèce a été de plus en plus abondante dans les pièges de détection et parmi les adultes émergeant des mangues infestées. Ce qui se rapproche de nos résultats. Dans la littérature, il a été rapporté que *B. invadens* peut infester les fruits-hôtes verts et mûrs et même les fruits tombés encore immatures (Diatta *et al.*, 2013). D'après Vayssières *et al.*, (2005), les mangues mûres et complètement mûres étaient les plus préférées pour la ponte de *B. dorsalis* comme il a été le cas dans notre étude. La dominance de cette espèce au début de la saison des pluies est corrélée avec les stades de prématurité et maturité des fruits.
La préférence des mangues matures par *Bactrocera dorsalis* s'expliquerait par le fait que ces mangues présentent des caractéristiques favorables au développement de sa descendance.

L'estimation du taux d'infestation des mangues par *Bactrocera dorsalis* pourrait donc se faire par analyse d'image. Ceci s'inscrirait dans une gestion durable du bioagresseur dans une perspective de réduction de l'usage des pesticides et de conformité des mangues aux normes phytosanitaires internationales.

3.12 Relation entre les paramètres physicochimiques de la mangue et la fréquence de piqûres de mouches.

La préférence des mangues matures par *Bactrocera dorsalis* s'expliquerait par le fait que ces mangues présenteraient des caractéristiques favorables au développement de sa descendance.
Les données obtenues sur les piqûres de mouches des fruits nous ont permis de faire des modèles linéaires généraux (famille : quasipoisson) pour relier les paramètres physicochimiques de la mangue à la fréquence de piqûres de mouches.
A partir de ces analyses (Tableau 7), il a été observé un effet positif significatif de la teneur en sucre sur le nombre de piqûres de mouches des fruits (R^2=0.08; p-value<0,001***). La teneur

en sucre soluble des mangues aurait donc un effet positif sur la fréquence de piqûres des mangues par les mouches des fruits. Etant donné que la teneur en sucre soluble évolue avec le niveau de maturité, la fréquence de piqure de mouches observée sur les mangues plus matures pourrait amener à conclure que les mouches sont plus attirées par les mangues les plus matures ayant une teneur en sucre élevée. Selon Messina et Jones, (1990), les changements physiologiques pendant la maturation influencent le comportement de ponte des mouches des fruits. Les changements dans les solides solubles totaux, TSS sont en corrélation avec l'évolution de l'utilisation de l'hôte au cours des stades de maturation. Ainsi, les fruits mûrs et complètement mûrs, par rapport aux fruits non mûrs, ont un TSS plus élevé (Vayssières *et al.*, 2014).

Il a été également noté un effet significatif positif du pH sur le nombre de piqûres de mouches des fruits (R^2=0.10 ; p-value<0,001***). L'augmentation du pH en fonction du niveau de maturité des mangues pourrait justifier la fréquence de piqure observé sur les mangues plus matures. On pourrait en déduire que les mouches sont plus attirées par les mangues les plus matures c'est-à-dire celles ayant un pH plus élevé.

Pour ce qui est de la TA des mangues, il a été observé un effet significatif négatif de l'acidité sur le nombre de piqûres de mouches des fruits (R^2= 0.05, p-value 0.002 **). L'acidité de la mangue aurait un effet sur la fréquence de piqûres des mangues par les mouches. La diminution de la TA des mangues en fonction du niveau de maturité pourrait donc être la cause de la fréquence de piqûres des mangues par les mouches. Les mangues les moins acides sont plus piquées que les mangues plus acides. Ambele et Afreh-Nuamah, (2012) ont remarqué que la variété 'Kent', avec un taux de TA plus élevé a enregistré plus de pupes que les autres variétés de mangues.

En résumé, une mangue présentant une teneur en sucre forte, un pH élevé et une TA faible se serait plus piquée qu'une mangue ayant une faible teneur en sucre, un pH faible et une TA faible. Il a été démontré que l'acidité élevée et la faible teneur en sucre libre de certaines variétés de mangues ont un effet négatif sur la survie des larves jusqu'à la pupaison (Hennessey et Schnell, 2001).

Lorsqu'on considère les mangues d'une même date d'échantillonnage, de la dernière date (Tableau 7), on remarque qu'il y a un effet de la teneur en sucre (R^2=0,08, p-value <0,05*), du pH (R^2=0,21, p-value<0,001***) et de l'acidité titrable (R^2=0.30, p-value<0,001***) sur les niveaux d'infestation des mangues par les mouches des fruits. Ceci confirme qu'il y a bien un effet du pH, de la teneur en sucre et de la teneur en acide des mangues sur les niveaux d'infestation.

Toutefois, il important de noter qu'en dehors de ces paramètres physicochimiques qui ont potentiellement un effet sur l'abondance des mouches dans le verger, la couleur et les odeurs des fruits, des rameaux et du feuillage de la plante hôte sont d'autres indices importants pour attirer les mouches des fruits qui pondent (Aluja et Prokopy, 1993; Prokopy et Vargas, 1996; Drew *et al.*, 2003; Vayssières *et al.*, 2005; Brévault et Quilici, 2008).

Tableau 7: Relation entre les paramètres physicochimiques des mangues et la fréquence de piqûres des mangues par les mouches.

	Situation	**Toutes les dates**	**Dernier mois**	**Dernier jour**
Teneur en sucre soluble	Pr(> |t|)	4.97e-14 ***	6.06e-07 ***	0.0402 *
	R^2	**0.080**	**0.092**	**0.084**
pH	Pr(> |t|)	<2e-16 ***	1.35e-09 ***	0.000163 ***
	R^2	**0.095**	**-0.044**	**0.214**
Acidité titrable	Pr(> |t|)	0.00277 **	0.00902 **	0.000157 ***
	R^2	**0.053**	**0.140**	**0.302**

Conclusion et perspectives

La production des mangues export au Sénégal est confrontée à des problèmes d'estimation du niveau de maturité et à des problèmes phytosanitaires. Cette étude a démontré montre que les paramètres morphologiques et physicochimiques de la mangue évoluent dans le temps. Il a été observé une corrélation négative entre la TSS et les paramètres morphologiques de la mangue. Le pH de la mangue présente une corrélation positive avec les paramètres morphologiques. La TA est corrélée négativement aux paramètres morphologiques de la mangue.

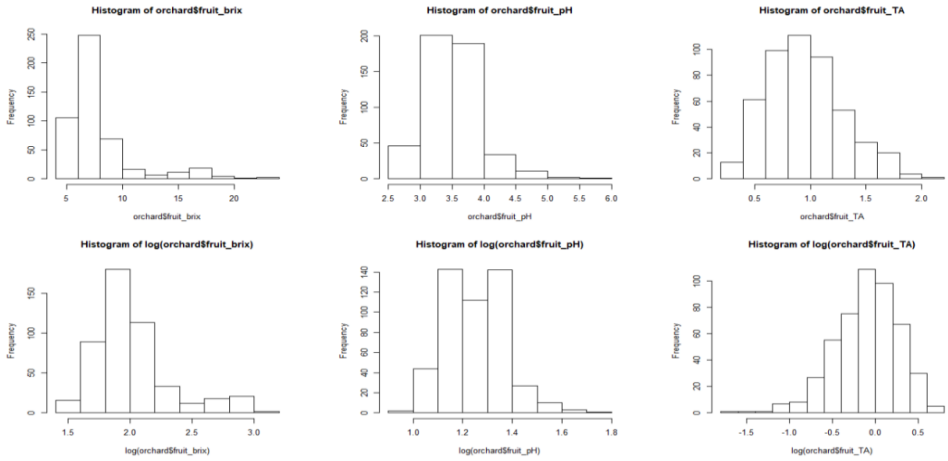
Les modèles linéaires établis pour estimer les paramètres de qualité des mangues utilisés dans la détermination du niveau de maturité des mangues à partir des indices de formes et de couleur extraits d'images ont permis de faire de bonnes prédictions de TSS et de pH mais une prédiction peu satisfaisante de TA.

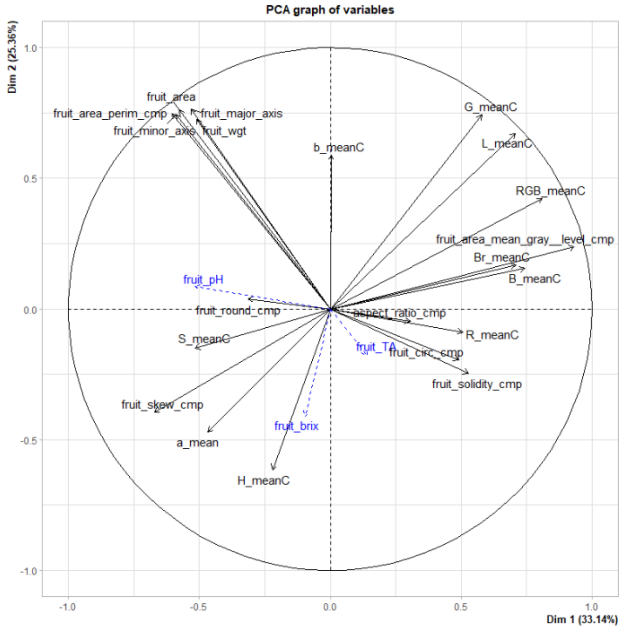
Nos résultats suggèrent qu'il est possible de compter le nombre de piqûres de mangue par analyses d'images et aussi d'estimer le taux d'infestation des mangues. On a également remarqué que les mouches sont plus attirées par les mangues les plus matures ayant une teneur en sucre élevée. Il a été observé un effet positif significatif de la TSS et du pH et un effet significatif négatif sur la fréquence de piqûres des mangues par les mouches des fruits. Ceci pourrait servir de base pour le développement d'outils d'aide à la décision à utiliser dans les programmes de protection des vergers de mangues.

A l'issue de cette étude, certaines perspectives se dégagent. Il serait intéressant par la suite, pour l'estimation du niveau de maturité, de prendre en compte la mesure de la fermeté qui est un indice du niveau de maturité souvent utilisé. Aussi, il serait intéressant de faire le même travail d'évaluation du niveau de maturité à partir d'image à une échelle beaucoup plus grande que celle d'un verger et sur une période d'étude beaucoup plus longue afin de prendre en compte certaines variabilités qui pourraient être dues aux conditions climatiques ou aux pratiques agricoles.

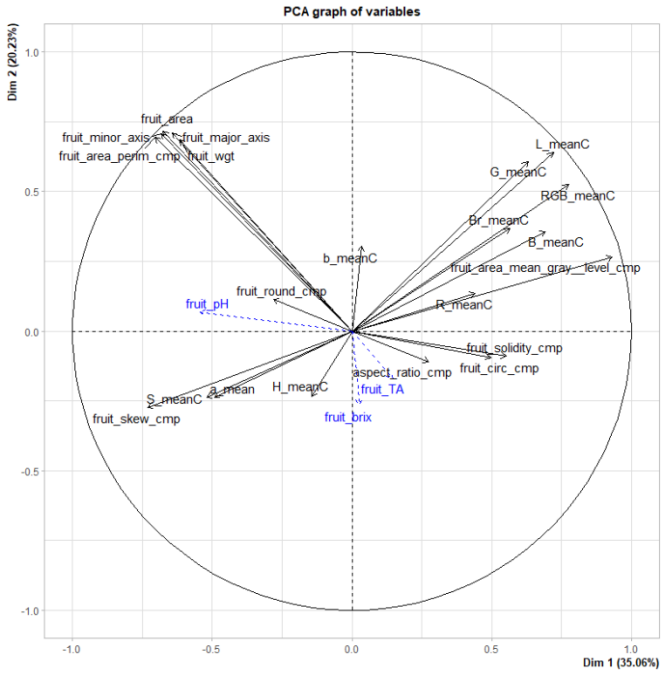
Une des finalités de ce travail est de pouvoir intégrer ces modèles d'estimation de niveaux de maturité des mangues à partir des indices de formes et de couleur à une application en cours de développement (PixFruit). Il s'agit d'une application qui pourrait à partir d'images RVB des arbres estimer le rendement en mangues du verger. En ce qui concerne la détection des piqûres de mouches par analyses d'images, il serait intéressant par la suite de travailler sur le calibrage des taches causées par les mouches des fruits sur mangues afin de pouvoir distinguer facilement sur des images de mangues s'il y a piqures de mouches ou pas.

Annexes

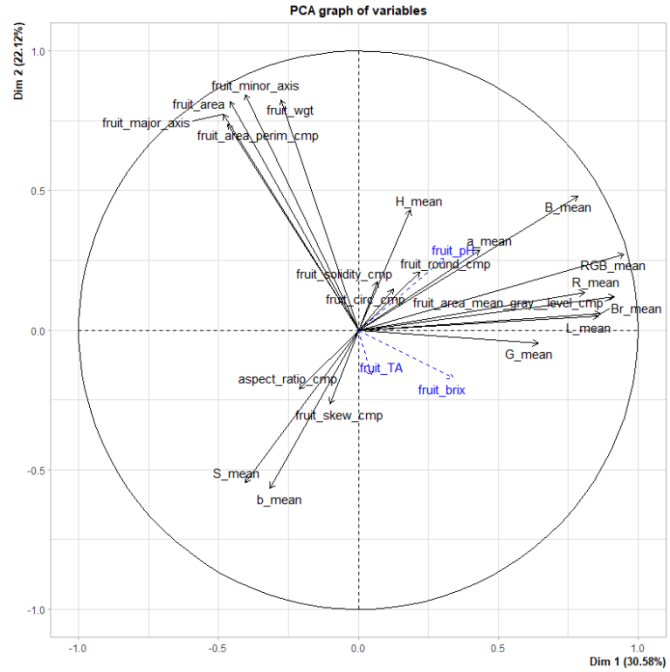




Analyse en composante principale (ACP) sur les images de mangues de face non exposée au soleil.



Analyse en composante principale (ACP) sur les images de mangues de face exposée au soleil.



Analyse en composante principale (ACP) sur les images de mangues prises au Verger

Références bibliographiques

Abu M. (2010) – Quality criteria for mango export in Ghana. *Unpublished Master's Theis, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi*.

Aguiar L. (2008) – Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004. PhD Thesis Thesis. Université du Québec à Montréal.

Aluja M., Prokopy R.J. (1993) – Host odor and visual stimulus interaction during intratree host finding behavior ofRhagoletis pomonella flies. *Journal of Chemical Ecology*, **19**, 2671–2696.

Ambele F.C., Afreh-Nuamah K. (2012) – Susceptibility of four mango varieties to the Africa Invader fly, Bactrocera invadens Drew, Tsuruta and White (Diptera: Tephritidae) in Ghana.

Arbonnier M. (2002) – Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest - Scientific Publications of the Muséum national d'Histoire naturelle, Paris.

ASEPEX (2012) – Modes de transformation de la mangue: La mangue, une affaire juteuse !

ASEPEX (2016) – Guide export, mangue du Sénégal.

Assoi E.K.N., Dibi W., Kouakou A.K., Kouakou B.K., Koffi T. (2019) – Nouvel outil de mesure non destructive de la qualité des mangues par télédétection. , 11.

Ayisha M., Niyas P. (2017) – Investigations on Maturity Indicators for Fruits. , 2.

Badii K.B., Billah M.K., Afreh Nuamah K., Obeng Ofori D., Nyarko G. (2015) – Review of the pest status, economic impact and management of fruit-infesting flies (Diptera: Tephritidae) in Africa. *African Journal of Agricultural Research*, **10**, 1488–1498.

Bakry F., Didier C., Ganry J., Lescot T., Pinon A., Rey J.-Y., Teisson C., Vannière H. (2002) – Agriculture spéciale. Les plantes comestibles : les espèces fruitières. *Mémento de l'agronome*.

Bally I.S.E. (2006) – Mangifera indica (mango). , 25.

Bidwell R.G.S. (1979) – *Plant Physiology (Second Edition)*.

Boissard P., Martin V., Moisan S. (2008) – A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, **62**, 81–93.

Bompard J.M. (2009) – Taxonomy and systematics. In: *The mango: botany, production and uses* (ed Litz RE), pp. 19–41. CABI, Wallingford.

Braz J. (2004) – Panorama du marché international de la mangue : cas de la filière d'exportation du Brésil. , 143.

Brévault T., Quilici S. (2008) – Influence of habitat pattern on orientation during host fruit location in the tomato fruit fly, Neoceratitis cyanescens. *Bulletin of entomological research*, **97**, 637–42.

Briot E. (1999) – Etude de la physiologie post-récolte de la mangue. PhD Thesis Thesis. UTC.

Cheng H.D., Jiang X.H., Sun Y., Wang J. (2001) – Color image segmentation: advances and prospects. *Pattern Recognition*, **34**, 2259–2281.

Cochereau P. (1970) – Les mouches des fruits et leurs parasites dans la zone indo-australo-pacifique et particulièrement en Nouvelle Calédonie- Horizon.

Dambreville A. (2013) – Croissance et développement du manguier (Mangifera indica L.) in natura: approche expérimentale et modélisation de l'influence d'un facteur exogène, la température, et de facteurs endogènes architecturaux. , 181.

Delroise A. (2003) – Caractrérisation de la qualité et étude du potentiel de la maturation de la mangue (Manguifera Indica L.) en fonction de son stage de récolte.

Diatta J. (2018) – Vers la maîtrise du rendement et de la qualité de la mangue au Sénégal: déterminants de la floraison, fructification, et impact de pratiques culturales et de facteurs environnementaux.

Diatta P., Rey J.-Y., Vayssieres J.-F., Diarra K., Coly E.V., Lechaudel M., Grechi I., Ndiaye S., Ndiaye O. (2013) – Fruit phenology of citruses, mangoes and papayas influences egg-laying preferences of *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae). *Fruits*, **68**, 507–516.

DiTommaso, Losey (2003) – Oviposition preference and larval performance of monarch butterflies (Danaus plexippus) on two invasive swallow-wort species - DiTommaso - 2003 - Entomologia Experimentalis et Applicata - Wiley Online Library.

Drew R.A.I., Prokopy R.J., Romig M.C. (2003) – Attraction of fruit flies of the genus Bactrocera to colored mimics of host fruit. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **107**, 39–45.

Drew R.A.I., Tsuruta K., White I.M. (2005) – A new species of pest fruit fly (Diptera: Tephritidae: Dacinae) from Sri Lanka and Africa. *African Entomology*, **13**, 149–154.

Elsayed S. (2016) – Passive reflectance sensing and digital image analysis for assessing quality parameters of mango fruits. *Scientia Horticulturae*, 12.
EUROPAFRIQUE (2013) – Analyse et propositions sur la construction des marches locaux –nationaux-regionaux en Afrique – Analyse complementaire.
Eyarkai Nambi V., Thangavel K., Manickavasagan A., Shahir S. (2017) – Comprehensive ripeness-index for prediction of ripening level in mangoes by multivariate modelling of ripening behaviour. *International Agrophysics*, **31**, 35–44.
Fadzli Abd Shaib M., Abdul Rahim R., Z. M. Muji S., Abd Aziz Ahmad A. (2017) – Investigating Maturity State and Internal Properties of Fruits Using Non-Destructive Techniques-A Review. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, **15**, 1574.
Fall afiétou T., Fall A.S. (2000) – Cités horticoles en sursis ? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal.CRDI, 2001, ISBN 0-88936-936-4, 120 p. *Bulletin de l'APAD*.
FAOSTAT (2013) – FAOSTAT, The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database.
FAOSTAT (2018) – FAOSTAT, The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database.
Fitt G.P. (1981) – The Ecology of Northern Australian Dacinae (Diptera:Tephritidae) I. Host Phenology and Utilization of Opilia amentacea Roxb. (Opiliaceae) by Dacus (Bactrocera) opiliae Drew & Hardy, with notes on some other species. *Australian Journal of Zoology*, **29**, 691–705.
Fmim S., Smd G., Fmd H., As J. (2017) – Digital Measurement of Maturity Indices of Mangoes using Selected Image Features. *Journal of Food Processing & Technology*, **8**.
Fontellas-Brandalha T.M.L., Zucoloto F.S. (2004) – Selection of oviposition sites by wild Anastrepha obliqua (Macquart) (Diptera: Tephritidae) based on the nutritional composition. *Neotropical Entomology*, **33**, 557–562.
French C. (2005) – The new invasive Bactrocera species. Insect pest control newsletter. *International Atomic Energy Agency, Vienna*.
Geethapriya N., Praveena D.S.M. (2017) – evaluation of fruit ripeness using electronic nose. *International Journal of Advanced Information Science and Technology*, 6.
Génard M., Bertin N., Borel C., Bussières P., Gautier H., Habib R., Lechaudel M., Lecomte A., Lescourret F., Lobit P. (2007) – Towards a virtual fruit focusing on quality: modelling features and potential uses. *Journal of Experimental Botany*, **58**, 917–928.
Grechi I., Sane C.A.B., Diame L., De Bon H., Benneveau A., Michels T., Huguenin V., Malezieux E., Diarra K., Rey J.-Y. (2013) – Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns. *Fruits*, **68**, 447–466.
Haff R.P., Saranwong S., Thanapase W., Janhiran A., Kasemsumran S., Kawano S. (2013) – Automatic image analysis and spot classification for detection of fruit fly infestation in hyperspectral images of mangoes. *Postharvest Biology and Technology*, **86**, 23–28.
Hallé (1978) – Tropical Trees and Forests - An Architectural Analysis | F. Halle | Springer.
Halle F., Oldeman R.A.A., Tomlinson P.B. (1978) – *Tropical Trees and Forests: An Architectural Analysis*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
Hennessey M., Schnell R. (2001) – Resistance of Immature Mango Fruits to Caribbean Fruit Fly (Diptera: Tephritidae). *The Florida Entomologist*, **84**, 318.
Hulme A.C. (1971) – The biochemistry of fruits and their products. Vol. 2. *The biochemistry of fruits and their products. Vol. 2*.
Ibaraki Y., Gupta S. (2014) – Image analysis for plants: Basic procedures and techniques. In: *Plant Image Analysis* (eds Gupta S, Ibaraki Y), pp. 25–40. CRC Press.
INFOCOMM (2016) – Mangue - un profil de produit de base par INFOCOMM, conference des Nations Unies sur le commerce et le developpement. , 23.
Ito H., Sugiyama J. (2002) – Non destructive harvest time decision of melons by a portable firmness tester. *Acta Horticulturae*, 367–371.
Jha S.N., Chopra S., Kingsly A.R.P. (2007) – Modeling of color values for nondestructive evaluation of maturity of mango. *Journal of Food Engineering*, **78**, 22–26.
Jha S.N., Jaiswal P., Narsaiah K., Gupta M., Bhardwaj R., Singh A.K. (2012) – Non-destructive prediction of sweetness of intact mango using near infrared spectroscopy. *Scientia Horticulturae*, **138**, 171–175.
Jha S.N., Kingsly A.R.P., Chopra S. (2006) – Physical and mechanical properties of mango during growth and storage for determination of maturity. *Journal of Food Engineering*, **72**, 73–76.

Kagy V. (2010) – Effet de l'ensoleillement en pré récolte sur l'acquisition d'une thermotolérance des mangues (Mangifera indica L.). Impact sur leur réponse physiologique aux traitements à la chaleur en après récolte. , 361.

Kalra S.K., Tandon D.K. (1983) – Ripening-behaviour of 'Dashehari' mango in relation to harvest period. *Scientia Horticulturae*, **19**, 263–269.

Kapse B.M., Katrodia J.S. (1997) – Ripening behaviour of "kesar" mangoes in relation to specific gravity. *Acta Horticulturae*, 669–678.

Kienzle S., Sruamsiri P., Carle R., Sirisakulwat S., Spreer W., Neidhart S. (2012) – Harvest maturity detection for 'Nam Dokmai #4' mango fruit (Mangifera indica L.) in consideration of long supply chains. *Postharvest Biology and Technology*, **72**, 64–75.

Konta I.S., Djiba S., Sane S., Diassi L., Ndiaye A.B., Noba K. (2016) – Etude de la dynamique de *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) dans les vergers de mangues en Basse Casamance : influence des facteurs climatiques. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **9**, 2698.

Kouno Y., Mizuno T., Maeda H. (1993) – Feasibility studies into nir technique for measurement of internal quality of some tropical fruits. *Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, 326–333.

Lalel H., 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.

Laroussilhe F. de (1980) – *Le Manguier, Techniques Agricoles et productions Tropicales, Colonies, agriculture*. G.P. Maisonneuve et Larose, Paris.

Léchaudel M., Joas J. (2006) – Quality and maturation of mango fruits of cv. Cogshall in relation to harvest date and carbon supply. *Australian Journal of Agricultural Research*, **57**, 419–426.

Léchaudel M., Joas J., Caro Y., Génard M., Jannoyer M. (2005) – Leaf:fruit ratio and irrigation supply affect seasonal changes in minerals, organic acids and sugars of mango fruit: Seasonal variations of quality in mango. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **85**, 251–260.

Lechaudel M., Joas J., Normand F., Urban L. (2012) – *Méthode de détermination de la maturité d'une mangue en vue de sa récolte*. INPI.

Lechaudel M., Urban L., Joas J. (2010) – Chlorophyll Fluorescence, a Nondestructive Method To Assess Maturity of Mango Fruits (Cv. 'Cogshall') without Growth Conditions Bias. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **58**, 7532–7538.

Leley, V., Narayana N., Daji J. (1943) – Biochemical studies in the growth and ripening...

Litz R.E. (Ed.) (2009) – *The mango: botany, production and uses*. CABI, Wallingford.

Loic (2012) – Comment corriger ou modifier la balance des blancs ? *Photograpix*.

MAER (2018) – M.A.E.R. - Ministère de l'Agriculture et de l'Equipement Rural - Nourrir le Sénégal, lutter contre la faim et la malnutrition. *M.A.E.R. - Ministère de l'Agriculture et de l'Equipement Rural*.

Martínez-Sandoval J., Murillo-Bracamontes E., Martínez-Rosas M., Miranda Velasco M., Cervantes De Ávila H. (2012) – Image Processing Applied in Agriculture. In: *Embedded Systems and Wireless Technology* (ed Block A), pp. 201–226. CRC Press.

Medlicott A.P., Bhogal M., Reynolds S.B. (1986) – Changes in peel pigmentation during ripening of mango fruit (Mangifera indica var. Tommy Atkins). *Annals of Applied Biology*, **109**, 651–656.

Mendoza F., Lu R. (2015) – Basics of Image Analysis. In: *Hyperspectral Imaging Technology in Food and Agriculture* Food Engineering Series. (eds Park B, Lu R), pp. 9–56. Springer New York, New York, NY.

Menu image J Menu image J,.

Messina F.J., Jones V.P. (1990) – Relationship between Fruit Phenology and Infestation by the Apple Maggot (Diptera: Tephritidae) in Utah. *Annals of the Entomological Society of America*, **83**, 742–752.

Momin M.A., Rahman M.T., Sultana M.S., Igathinathane C., Ziauddin A.T.M., Grift T.E. (2017) – Geometry-based mass grading of mango fruits using image processing. *Information Processing in Agriculture*, **4**, 150–160.

Moscetti R., Haff R.P., Saranwong S., Monarca D., Cecchini M., Massantini R. (2014) – Nondestructive detection of insect infested chestnuts based on NIR spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, **87**, 88–94.

Nandi C.S., Tudu B., Koley C. (2012) – An automated machine vision based system for fruit sorting and grading. In: *2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST)*, pp. 195–200.

Ndiaye O. (2009) – Plantes hôtes et foyers de réinfestation des mouches des fruits: facteurs phénologiques, morpho physiologiques déterminants sur les infestations de la mangue.

Ndiaye S., Diédhiou P.M., Ndiaye O., Rey Y., Mbaye N., Ballayéra A., Touré T. (2008) – Dynamique des populations, tests d'attractivité, de contrôle dans des vergers de la zone de Niayes (06 – 11/2008). , 32.

Ndiaye O., Ndiaye S., Djiba S., Ba C.T., Vaughan L., Rey J.-Y., Vayssières J.-F. (2015) – Preliminary surveys after release of the fruit fly parasitoid *Fopius arisanus* Sonan (Hymenoptera Braconidae) in mango production systems in Casamance (Senegal). *Fruits*, **70**, 91–99.

Ndiaye O., Vayssieres J.-F., Rey J.Y., Ndiaye S., Diedhiou P.M., Ba C.T., Diatta P. (2012) – Seasonality and range of fruit fly (Diptera: Tephritidae) host plants in orchards in Niayes and the Thiès Plateau (Senegal). *Fruits*, **67**, 311–331.

Ndoye S. (2011) – Les écosystèmes hôtes potentiels de# Bactrocera invadens#(Drew et al)(Dipteria) en saison sèche: le cas des bas fond dans la zone des Niayes du Sénégal.

Nordey T. (2014) – l'hétérogénéité de la qualité et de la maturité des. , 221.

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.

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.

Nordey T., Léchaudel M., Joas J., Génard M. (2015) – Use of the reflectance spectra as a non-destructive indicator of quality, i.e., color, and maturity, i.e., pigment content, of mango fruit. *Acta Horticulturae*, 237–242.

Normand F., Vincenot D. (2009) – Didier Vincenot (Chambre d'Agriculture de La Réunion). , 126.

Otsu N. (1979) – A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **9**, 62–66.

Ouédraogo S.N. (2007) – Etude des attaques des mouches des fruits (Diptera Tephritidae) sur la mangue dans la Province du Kénédougou (ouest du Burkina Faso). , 70.

Passannet A.S., Aghofack-Nguemezi J. (2018) – Variabilité des caractéristiques physiques des mangues cultivées au Tchad : caractérisation de la diversité fonctionnelle. , 11.

Polinar Y.Q., Yaptenco K.F., Peralta E.K., Agravante J.U. (2019) – Near-Infrared Spectroscopy for Non-Destructive Prediction of Maturity and Eating Quality of 'Carabao' Mango (Mangifera indica L.) Fruit

Prakash K., Saravanamoorthi P., Sathishkumar R., Parimala M. (2017) – A study of image processing in agriculture. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, **9**, 3311.

Preterre A.-L. (2017) – Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, de l'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers et Evaluation de la relation entre l´infestation des mangues et leur état de maturité. , 52.

Prokopy R.J., Vargas R.I. (1996) – Attraction of Ceratitis capitata (Diptera: Tephritidae) flies to odor of coffee fruit. *Journal of chemical ecology*, **22**, 807–820.

Qing Z., Ji B., Zude M. (2007) – Predicting soluble solid content and firmness in apple fruit by means of laser light backscattering image analysis. *Journal of Food Engineering*, **82**, 58–67.

Rafalimanana P.H. (2011) – Accumulation des réserves lipidiques et capacité germinative des graines de hetatra (Podocarpus gaussenii). , 27.

Raja Sekar L., Ambika N., Divya V., Kowsalya T. (2018) – Fruit classification system using computer vision: a review. *International Journal of Trend in Research and Development (IJTRD), ISSN*, 2394–9333.

Rattanapun W., Amornsak W., Clarke A.R. (2009) – *Bactrocera dorsalis* preference for and performance on two mango varieties at three stages of ripeness. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **131**, 243–253.

Ravindra M.R., Goswami T.K. (2008) – Modelling the respiration rate of green mature mango under aerobic conditions. *Biosystems Engineering*, **99**, 239–248.

Reid M.S. (1992) – Maturation and , Maturity Indices. In: *Maturation and , Maturity Indices*, pp. 55–62.
Rey J., Dia M. (2010) – Mangue : des vergers villageois aux nouvelles plantations d'exportation.
Rey J.-Y., Diallo T.M., Vannière H., Didier C., Kéita S., Sangaré M. (2004) – La mangue en Afrique de l'Ouest francophone : variétés et composition variétale des vergers. *Fruits*, **59**, 191–208.
Rey J.-Y., Diallo T.M., Vannière H., Didier C., Kéita S., Sangaré M. (2006) – The mango in French-speaking West Africa. *Fruits*, **61**, 281–289.
Saranwong S., Haff R.P., Thanapase W., Janhiran A., Kasemsumran S., Kawano S. (2011) – A feasibility study using simplified near infrared imaging to detect fruit fly larvae in intact fruit. *Journal of near infrared spectroscopy*, **19**, 55–60.
Saranwong S., Sornsrivichai J., Kawano S. (2004) – Prediction of ripe-stage eating quality of mango fruit from its harvest quality measured nondestructively by near infrared spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*, **31**, 137–145.
Saranwong S., Thanapase W., Suttiwijitpukdee N., Rittiron R., Kasemsumran S., Kawano S. (2010) – Applying near Infrared Spectroscopy to the Detection of Fruit Fly Eggs and Larvae in Intact Fruit. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, **18**, 271–280.
Sarron J., Burger-Leenhardt D., Jeuffroy M.-H., Bellon-Maurel V., Lauri P.-É., Nesme T., Malézieux É., Faye É. (2019) – Estimation spatialisée des rendements d'une culture pérenne en Afrique de l'Ouest : le cas du manguier au Sénégal. , 272.
Saxena L., Armstrong L. (2014) – A survey of image processing techniques for agriculture. , 14.
Simão R.A., Silva A.P.F.B., Peroni F.H.G., do Nascimento J.R.O., Louro R.P., Lajolo F.M., Cordenunsi B.R. (2008) – Mango Starch Degradation. I. A Microscopic View of the Granule during Ripening. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56**, 7410–7415.
Slaughter D.C. (2009) – Nondestructive Maturity Assessment Methods for Mango. *University of California, Davis*, 1–18.
Subedi P.P., Walsh K.B., Owens G. (2007) – Prediction of mango eating quality at harvest using short-wave near infrared spectrometry. *Postharvest Biology and Technology*, **43**, 326–334.
Subramanyam H., Krishnamurthy S., Parpia H.A.B. (1975) – Physiology and biochemistry of mango fruit. In: *Advances in Food Research*, pp. 223–305. Elsevier.
Sun D.-W. (2008) – *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*.
Surya Prabha D., Satheesh Kumar J. (2015) – Assessment of banana fruit maturity by image processing technique. *Journal of Food Science and Technology*, **52**, 1316–1327.
Teoh C.C., Syaifudin A.R.M. (2007) – Image processing and analysis techniques for estimating weight of Chokanan mangoes. , 8.
Ternoy J., Austin J.E., Christophe P., Massamba D. (2006) – Mango value chain Senegal: analysis and strategic framework for sub-sector growth initiatives.
TERRE RÉUNION (2019) – La réunion sous la menace de la mouche des fruits,.
Touré O., Seck S.M. (2005) – *Exploitations familiales et entreprises agricoles dans la zone des Niayes au Sénégal*. International Institute for Environment and Development.
UC Davis (2010) – Mango_Maturity_And_Ripeness_Guide.University of Florida and the University of California-Davis.
Valente M., Ferrandis J.-Y. (2003) – Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method. *Postharvest Biology and Technology - POSTHARVEST BIOL TECHNOL*, **29**, 219–228.
Vannière H., Rey J.-Y., Vayssières J.-F. (2013) – Guide de bonnes pratiques phytosanitaires pour la mangue (# Mangifera indica#) issue de la production biologique.
Vayssières J.-F. (2012) – Inter-relations entre les différents niveaux trophiques concernant les tephritidae vis-a-vis des cultures horticoles en zone tropicale. , 158.
Vayssières J.-F., Adandonon A., N'Diaye O., Sinzogan A., Kooymann C., Badji K., Rey J.-Y., Wharton R.A. (2012) – Native parasitoids associated with fruit flies (Diptera: Tephritidae) in cultivated and wild fruit crops in Casamance, Senegal. *African Entomology*, **20**, 308–315.
Vayssières J.-F., Goergen G., Lokossou O., Dossa P., Akponon C. (2005) – A new Bactrocera species in Benin among mango fruit fly (Diptera: Tephritidae) species. *Fruits*, **60**, 371–377.

Vayssières J.-F., Korie S., Ayegnon D. (2009) – Correlation of fruit fly (Diptera Tephritidae) infestation of major mango cultivars in Borgou (Benin) with abiotic and biotic factors and assessment of damage. *Crop protection*, **28**, 477–488.

Vayssières J.-F., Rey J.-Y., Traoré L. (2007) – Distribution and host plants of Bactrocera cucurbitae in West and Central Africa. *Fruits*, **62**, 391–396.

Vayssières J.-F., Sinzogan A., Adandonon A., Rey J.-Y., Dieng E.O., Camara K., Sangaré M., Ouedraogo S., Hala N., Sidibé A., Keita Y., Gogovor G., Korie S., Coulibaly O., Kikissagbé C., Tossou A., Billah M., Biney K., Nobime O., Diatta P., N'Dépo R., Noussourou M., Traoré L., Saizonou S., Tamo M. (2014) – Annual population dynamics of mango fruit flies (Diptera: Tephritidae) in West Africa: socio-economic aspects, host phenology and implications for management. *Fruits*, **69**, 207–222.

Walsh K., Wang Z. (2018) – Monitoring fruit quality and quantity in mangoes. In: *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science* (eds Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), Spain, Saúco VG), pp. 313–338. Burleigh Dodds Science Publishing.

Wang J., Nakano K., Ohashi S., Kubota Y., Takizawa K., Sasaki Y. (2011) – Detection of external insect infestations in jujube fruit using hyperspectral reflectance imaging. *Biosystems Engineering*, **108**, 345–351.

Wang K., Zhang S., Wang Z., Liu Z., Yang F. (2013) – Mobile smart device-based vegetable disease and insect pest recognition method. *Intelligent Automation & Soft Computing*, **19**, 263–273.

Wilson K. (1988) – Egg laying decisions by the bean weevil Callosobruchus maculatus. *Ecological Entomology*, **13**, 107–118.

Wongmetha O., Ke L.-S., Liang Y.-S. (2015) – The changes in physical, bio-chemical, physiological characteristics and enzyme activities of mango cv. Jinhwang during fruit growth and development. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, **72**, 7–12.

Yashoda H.M., Prabha T.N., Tharanathan R.N. (2007) – Mango ripening – Role of carbohydrases in tissue softening. *Food Chemistry*, **102**, 691–698.

Zakaria A., Shakaff A.Y.M., Masnan M.J., Saad F.S.A., Adom A.H., Ahmad M.N., Jaafar M.N., Abdullah A.H., Kamarudin L.M. (2012) – Improved maturity and ripeness classifications of magnifera indica cv. harumanis mangoes through sensor fusion of an electronic nose and acoustic sensor. *Sensors*, **12**, 6023–6048.

Zhuang J., Hou C., Tang Y., He Y., Guo Q., Miao A., Zhong Z., Luo S. (2019) – Assessment of External Properties for Identifying Banana Fruit Maturity Stages Using Optical Imaging Techniques. *Sensors*, **19**, 2910.